



**Universität
Zürich^{UZH}**

Psychologisches Institut

Philosophische Fakultät der Universität Zürich

Dyskalkulie

Eine Analyse von Fehlermustern und der neuronalen Struktur

Masterarbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Science UZH in Psychologie
der Philosophischen Fakultät der Universität Zürich

Verfasserin: Patricia Meier

Matrikel-Nr.: 14-657-415

Psychologisches Institut – Neuropsychologie

Betreuer: Prof. Dr. rer. nat. Lutz Jäncke

Ko-Betreuerinnen: PD Dr. sc. nat. Karin Kucian und Dr. phil. Ursina McCaskey

Dübendorf, 30.11.2020

Danksagung

Die Zeit, in der meine Masterarbeit entstanden ist, war sehr lehrreich, intensiv und hat mich immer wieder herausgefordert. Gerade aufgrund der Unsicherheiten und ständigen Änderungen, die wegen des vorherrschenden Coronavirus ausgesprochen werden mussten. Es war ein Privileg und hat Spass gemacht, mich für eine längere Zeit in ein Thema vertiefen zu können, dessen Relevanz in der Gesellschaft ich als gross erachte. Zudem wurde mein langgehegter Wunsch erfüllt, einmal einen Einblick in die MRT-Forschung zu erhalten. Den Umgang mit den verschiedenen Softwares zu erlernen, hat mir zudem grosse Freude bereitet. Dass ich die Arbeit mit einem befriedigenden Gefühl zu Ende bringen konnte und so viel profitiert habe, verdanke ich vielen verschiedenen Personen, die mich während den letzten Monaten begleitet haben. Die Teamarbeit und Hilfsbereitschaft, die ich erfahren durfte, haben mich sehr berührt. Allen voran möchte ich ein riesiges Dankeschön an PD Dr. sc. nat. Karin Kucian und Dr. phil. Ursina McCaskey aussprechen, die mich während der gesamten Zeit mit viel Energie, Geduld und einer positiven Einstellung begleitet haben und mir in vielen Dingen ein Vorbild waren. Ich möchte aber auch dem gesamten MR-Team danken, das mich offen empfangen und gleich als Teammitglied behandelt sowie geduldig immer wieder meine Probleme mit dem CS6 gelöst hat und Ursi, welche stets ein offenes Ohr und eine helfende Hand bereithielt. Dankbar war ich auch für die Unterstützung von Noemi Gloor und meiner Freundin Nadet, welche mich bezüglich meiner Statistikfragen beraten haben. Merci auch an Frau Moser Opitz, welche mir Daten zur Verfügung gestellt hat, damit eine Kontrollgruppe gebildet werden konnte, und an Christian Vögeli von Dybuster, der mir Angaben zur Auswertung des Mathematikangstinterviews und einen Online-Zugang organisierte. Weiter möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Jäncke, Herrn Dr. Elmer und Herrn Prof. Dr. rer. nat. Meyer von der Universität Zürich bedanken, die mir im Rahmen des Forschungskolloquiums oder anhand von angebotenen Gesprächen stets unterstützend und wohlwollend begegnet sind. Erwähnen möchte ich auch alle Versuchspersonen, die über all die Jahre ihre Daten zur Verfügung gestellt haben, um zum Störungsbild der Dyskalkulie weitere Kenntnisse gewinnen zu können und damit einen grossen Beitrag für einen besseren Umgang mit der Dyskalkulie leisten. Mein grösster Dank gilt meinem Mann, meiner Familie und meinen Freunden, die immer wieder auf meine Anwesenheit verzichten mussten. Ich bin sehr froh, euch in meinem Leben zu haben. Vielen Dank Daniel für deine Geduld, Liebe und die Unterstützung bei der Erfüllung meiner Träume. Du bist wunderbar und mein Diamant.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|--------------|
| Abbildungsverzeichnis..... | |
| Tabellenverzeichnis..... | |
| Anhangsverzeichnis | |
| Abkürzungsverzeichnis | |
| Abstract..... | |
| Einleitung..... | 1 |
| Dyskalkulie | 1 |
| Definition. | 1 |
| Begrifflichkeiten. | 3 |
| Epidemiologie..... | 3 |
| Prävalenz. | 3 |
| Geschlechterverteilung. | 3 |
| Verlauf und Prognose. | 4 |
| Auswirkungen und Langzeiteffekte..... | 5 |
| Ätiologie. | 6 |
| Erscheinungsbild..... | 9 |
| Kognitive Defizite. | 9 |
| Komorbiditäten. | 11 |
| Subtypen. | 12 |
| Subtypen je genereller kognitiver Defizite. | 12 |
| Subtypen je domänenspezifischer numerischer Defizite. | 13 |
| Einteilung anhand von Leistungsprofilen..... | 13 |
| Entwicklung der Zahlenverarbeitung und des Rechnens | 14 |
| Entwicklung von frühem numerischem Wissen. | 14 |
| Zählen. | 15 |
| Symbolische Repräsentationen. | 16 |
| Fingerrechnen. | 17 |
| Arithmetischer Faktenabruf und Strategien..... | 17 |
| Zahlenverarbeitung und Rechnen bei Kindern mit Rechenstörungen | 17 |
| Entwicklungsmodelle der Zahlenverarbeitung und des Rechnens | 18 |
| Neuronale Grundlagen und Korrelate der typischen Entwicklung | 20 |
| Entwicklungsveränderungen..... | 22 |
| Kinder. | 23 |
| Gehirnfunktion..... | 23 |
| Gehirnstruktur..... | 23 |
| Konnektivität. | 24 |
| Methode | 25 |
| Die Magnetresonanztomographie | 25 |
| Kernspin..... | 25 |
| Relaxation und Bildkontraste. | 26 |
| Räumliche Informationen. | 28 |

DYSKALKULIE – FEHLERMUSTER UND GEHIRNSTRUKTUR

| | |
|--|-----------|
| Grundlagen der strukturellen Magnetresonanztomographie. | 29 |
| Morphometrische Verarbeitung..... | 29 |
| Verhaltensstudie..... | 33 |
| Theoretischer Hintergrund | 33 |
| Diagnostik bei Kindern und Jugendlichen..... | 33 |
| Das sich entwickelnde Gehirn. | 34 |
| Entwicklungsverläufe. | 35 |
| Methodische Besonderheiten und mögliche Probleme der Diagnosestellung..... | 36 |
| Diagnostik der Dyskalkulie. | 37 |
| S3-Leitlinien. | 38 |
| Kinderspital Zürich..... | 39 |
| Fragestellungen und Hypothesen..... | 39 |
| Methoden | 44 |
| Studiendesign..... | 44 |
| Stichprobe und Rekrutierung. | 44 |
| Neuropsychologische Testverfahren. | 45 |
| BASIS-MATH 4-8. | 45 |
| Intelligenztests. | 46 |
| TAP..... | 47 |
| Corsi..... | 48 |
| MAI. | 48 |
| Statistische Analyse. | 48 |
| Ergebnisse | 51 |
| Deskriptive Statistik..... | 51 |
| Gruppenunterschiede. | 52 |
| Basisnumerische Fertigkeiten..... | 52 |
| Effiziente Strategien und Faktenwissen. | 53 |
| Intelligenz. | 56 |
| Geschlecht. | 56 |
| Zusammenhänge..... | 57 |
| Mathematikangst. | 57 |
| Domänenübergreifende kognitive Fähigkeiten. | 57 |
| Klassenstufe..... | 58 |
| Itemanalyse und Reliabilitätsanalyse..... | 58 |
| Explorative Faktorenanalyse. | 59 |
| Hierarchische Clusteranalyse..... | 62 |
| Diskussion..... | 65 |
| Basisnumerische Fertigkeiten..... | 65 |
| Einflussfaktoren..... | 66 |
| Clusteranalyse..... | 68 |
| Fragestellungen und Hypothesen..... | 69 |
| Limitierungen und Stärken. | 70 |
| Schlussfolgerungen und Fazit. | 71 |

DYSKALKULIE – FEHLERMUSTER UND GEHIRNSTRUKTUR

| | |
|---|------------|
| MRT-Studie | 73 |
| Theoretischer Hintergrund | 73 |
| Neuronale Korrelate von Rechenschwierigkeiten. | 73 |
| Gehirnfunktion..... | 73 |
| Gehirnstruktur..... | 74 |
| Konnektivität. | 75 |
| Fragestellungen und Hypothese | 77 |
| Methoden | 78 |
| Studiendesign..... | 78 |
| Stichprobe und Rekrutierung. | 78 |
| Neuropsychologische Testverfahren. | 79 |
| WISC-IV..... | 79 |
| Corsi-Block-Suppression-Test..... | 79 |
| ZAREKI-R..... | 79 |
| Edinburgh Handedness Inventory. | 80 |
| Datenverarbeitung..... | 80 |
| Analyse. | 80 |
| Verhaltensdaten. | 80 |
| Voxelbasierte Morphometrieanalyse..... | 81 |
| Oberflächenbasierte Morphometrieanalyse..... | 83 |
| Ergebnisse | 84 |
| Verhaltensdaten. | 84 |
| Voxelbasierte Morphometrie. | 84 |
| Oberflächenbasierte Morphometrie. | 85 |
| Diskussion..... | 87 |
| Volumen der grauen Substanz. | 88 |
| Kortikale Oberflächenmerkmale. | 89 |
| Entwicklungsbedingte Veränderungen. | 93 |
| Limitierungen und Stärken. | 93 |
| Schlussfolgerungen und Fazit..... | 95 |
| Gesamtdiskussion..... | 96 |
| Diagnostik. | 97 |
| Bildgebung durch Magnetresonanztomographie. | 98 |
| Praktische Relevanz. | 98 |
| Zukunft..... | 99 |
| Fazit und Ausblick | 100 |
| Literaturverzeichnis | 101 |
| Anhang..... | I |
| Selbstständigkeitserklärung..... | |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|--------------|---|----|
| Abbildung 1 | Mehrfach-Defizit-Modell | 8 |
| Abbildung 2 | Vier-Stufen-Modell der Entwicklung numerischer Kognition | 20 |
| Abbildung 3 | Neuronales Netzwerk der Zahlenverarbeitung | 21 |
| Abbildung 4 | Das Magnetfeld im MRT | 26 |
| Abbildung 5 | Ausrichtung im Magnetfeld | 26 |
| Abbildung 6 | Darstellung der T1- und T2-Relaxationszeiten je Gewebeart | 27 |
| Abbildung 7 | Räumliche Information | 29 |
| Abbildung 8 | Darstellung der Ortskodierung | 29 |
| Abbildung 9 | Operationen der Normalisierung | 30 |
| Abbildung 10 | Schematische Darstellung des Ablaufs der VBM | 32 |
| Abbildung 11 | Verläufe nach einer Hirnschädigung | 36 |
| Abbildung 12 | Punkteverteilung des BASIS-MATH 4-8 | 51 |
| Abbildung 13 | Screeplot der explorativen Faktorenanalyse | 60 |
| Abbildung 14 | Dendrogramm der Hierarchischen Clusteranalyse | 63 |
| Abbildung 15 | Verarbeitungsschritte der VBM und SBM | 83 |
| Abbildung 16 | Ergebnisse der VBM-Analyse | 85 |
| Abbildung 17 | Ergebnisse der SBM-Analyse | 86 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabelle 1 | Signifikant unterschiedliche Aufgaben des BM 4-8 | 53 |
| Tabelle 2 | Häufigkeit der signifikanten Aufgaben des BM 4-8 | 53 |
| Tabelle 3 | Signifikante Unterschiede je Aufgabenart, Inhaltsbereich und Anforderungsniveau | 54 |
| Tabelle 4 | Signifikant unterschiedliche Aufgaben je Rechenstrategie | 55 |
| Tabelle 5 | Häufigkeit der signifikanten Aufgaben je Rechenstrategie | 56 |
| Tabelle 6 | Signifikante Aufgaben mit hohen Trennschärfen | 59 |
| Tabelle 7 | Faktorenbeschreibungen der explorativen Faktorenanalyse | 61 |
| Tabelle 8 | Clusterbeschreibungen der Hierarchischen Clusteranalyse | 64 |
| Tabelle 9 | Ergebnisse VBM- und SBM-Analyse | 87 |

DYSKALKULIE – FEHLERMUSTER UND GEHIRNSTRUKTUR

Anhangsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----|
| Anhang A | Aufgaben des BASIS-MATH 4-8 | I |
| Anhang B | Deskriptive Statistik der neuropsychologischen Tests | III |
| Anhang C | Rotierte Komponentenmatrix der Faktorenanalyse | VII |

DYSKALKULIE – FEHLERMUSTER UND GEHIRNSTRUKTUR

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------------|--|
| α | Cronbachs Alpha |
| AD(H)S | Aufmerksamkeits- / Hyperaktivitätsstörung |
| ANCOVA | Kovarianzanalyse |
| AWMF | Arbeitsgemeinschaft der Medizinischen Fachgesellschaften |
| BM 4-8 | BASIS-MATH 4-8 |
| CFT20-R | Grundintelligenztest Skala 2 – Revision |
| Corsi | Corsi-Block-Tapping-Test |
| CSF | Zerebrospinalflüssigkeit |
| DD | Dyskalkuliker |
| DSM-5 | Diagnostischer und statistischer Leitfaden psychischer Störungen |
| DTI | Diffusion-Tensor-Imaging-Methode |
| ICD-10 | Internationale Klassifikation der Krankheiten und verwandter Gesundheitsprobleme |
| IDS-2 | Intelligence and Development Scales - 2 |
| fMRT | funktionelle Magnetresonanztomographie |
| FWHM | Full Width at Half Maximum (Gaussian-Kernel) |
| GM | graue Hirnsubstanz |
| HAWIK-IV | Hamburg-Wechsler Intelligenztest für Kinder |
| IPS | Intraparietaler Sulcus |
| K-ABC | Kaufman Assessment Battery for Children |
| KG | Kontrollgruppe |
| LRS | Lese- und Rechtschreibstörung |
| M | Mittelwert |
| MAI | Mathematikangstinterview |
| MANOVA | Multivariate Varianzanalyse |
| Mdn | Median |
| MNI | Montreal Neurobiological Institute |
| MRT | Magnetresonanztomographie |
| n | Stichprobengröße |
| η^2_p | partielltes Eta-Quadrat |
| P | Schwierigkeitsindex |
| p | p-Wert |

DYSKALKULIE – FEHLERMUSTER UND GEHIRNSTRUKTUR

| | |
|-------------------|---|
| p _{Bonf} | Bonferroni-korrigierter p-Wert |
| PR | Prozentrang |
| r | Effektstärke (nach Cohen) |
| r _{it} | korrigierte Trennschärfe |
| SBM | oberflächenbasierte Morphometrie |
| SD | Standardabweichung |
| SPM | Statistical Parametric Mapping |
| TAP | Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung |
| TE | Echozeit |
| TIV | intrakranielles Volumen |
| TR | Repetitionszeit |
| U | Mann-Whitney-U-Wert |
| VBM | voxelbasierte Morphometrie |
| V _{pn} | Versuchspersonen |
| WAIS-IV | Wechsler Intelligenztest für Erwachsene in deutscher Fassung (4. Ausgabe) |
| WISC-V | Wechsler Intelligenztest für Kinder in deutscher Fassung (5. Ausgabe) |
| WM | weisse Hirnsubstanz |

Abstract

Das Störungsbild der Dyskalkulie ist mit einer Prävalenz von ca. 6 % weit verbreitet und ruft teilweise lange Leidenswege und etliche Folgeprobleme hervor. Schwierigkeiten bei den basisnumerischen Fertigkeiten werden dabei als Kerndefizit der Störung angesehen, weshalb im Rahmen der Diagnostik besonderes Augenmerk auf diese Fertigkeiten gelegt werden sollte. Der BASIS-MATH 4-8 ist ein Test, der in der Diagnostik eingesetzt werden kann und mit dem geprüft wird, inwiefern die basisnumerischen Fertigkeiten entwickelt sind. In einer ersten Studie wurde deshalb untersucht, inwiefern sich das Lösungsverhalten im BASIS-MATH 4-8 zwischen Personen mit und ohne Dyskalkulie unterscheidet und ob spezifische Fehlermuster beobachtbar sind, die wichtige Hinweise für die Diagnostik von Rechenstörungen geben könnten. Untersucht wurden 86 Kinder und Jugendliche, welche diesen Test absolviert hatten. Berechnet wurden Gruppenunterschiede anhand des Mann-Whitney-U-Tests, Korrelationsanalysen sowie eine Faktoren-, Reliabilitäts- und Clusteranalyse. Dabei zeigte sich, dass Dyskalkuliker deutliche Beeinträchtigungen der basisnumerischen Fertigkeiten aufweisen und das Lösungsverhalten sowie vorhandene Fehler ziemlich heterogen ausfallen. Dieser Tatsache sollte in der Diagnostik Rechnung getragen werden. In einem zweiten Teil wurde der Blick auf die neurokognitive Forschung gerichtet. In den letzten Jahren tauchte vermehrt die Frage nach möglichen neuronalen Veränderungen bei Menschen mit Rechenstörungen auf. Gerade bei Kindern sind Untersuchungen der Hirnstruktur kaum vorhanden, wobei erste Ergebnisse darauf hinweisen, dass verschiedene Hirngebiete, die in die Zahlenverarbeitung und das Rechnen eingebunden sind, verändert sein könnten. Deshalb wurde die Fragestellung untersucht, inwiefern sich Kinder und Jugendliche mit und ohne Rechenstörungen hinsichtlich der neuronalen Strukturen unterscheiden. Dafür wurden 52 MRT-Bilder anhand der Methode der voxelbasierten und oberflächenbasierten Morphometrie analysiert. Es zeigte sich, dass bei Dyskalkulikern sowohl das Volumen der grauen Substanz wie auch kortikale oberflächenbasierte Kennwerte in temporalen, parietalen, frontalen und okzipitalen Regionen sowie in der Insula, dem Gyrus cinguli und dem Corpus callosum geringer ausfallen. Die Untersuchungen verdeutlichen, wie wichtig eine differenzierte Diagnostik der mathematischen Teilleistungen bei Dyskalkulie hinsichtlich spezifischer Interventionen ist und dass neuronale Unterschiede bestehen, deren Ursachen und Auswirkungen jedoch noch genauer und mit Langzeitstudien untersucht werden müssen.

Keywords: Dyskalkulie, Rechenstörung, Zahlenverarbeitung, Rechnen, numerische Entwicklung, basisnumerische Fertigkeiten, neuronale Struktur, Kinder, MRT

Einleitung

Dyskalkulie

Sätze wie «Mathematik war nie meine Stärke, aber für den Alltag ist dieses Wissen auch nicht sonderlich relevant» sind weit verbreitet und die Akzeptanz von Defiziten im mathematischen Bereich scheint höher zu sein als in anderen Fachgebieten. Wo liegt die Grenze, dass mathematische Schwierigkeiten das Leben nachhaltig negativ beeinflussen? Und sind solche Defizite wirklich so harmlos, wie teilweise angenommen wird? Zahlen begegnen uns im Alltag immer wieder: sei es in der Schule im klassischen Mathematikunterricht, beim Lesen eines Fahrplanes oder beim Kochen. Der Mensch kann sich den Zahlen schlicht nicht entziehen. Betroffene sind folglich nicht nur in der Schule oder der beruflichen Tätigkeit eingeschränkt, sondern begegnen ihren Rechenschwächen tagtäglich in verschiedenen Alltagssituationen. Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Thema Mathematik im Allgemeinen sowie spezifischen Problemen beim Rechnen und wirft einen Blick auf das Gehirn von Dyskalkulikern (DD). Zu Beginn soll ein Überblick über das Störungsbild der Dyskalkulie geschaffen werden. Danach wird aufgezeigt, wie sich die Zahlenverarbeitung und die Rechenleistung entwickeln und gestalten und welche Modelle aus einer neuropsychologischen Sichtweise entstanden sind. In einem weiteren Schritt werden Kenntnisse der neuronalen Grundlagen der Zahlenverarbeitung vorgestellt. Schliesslich wird für ein besseres Verständnis der heutigen bildgebenden Methoden die Magnetresonanztomographie-Methode (MRT) eingeführt.

Im Rahmen einer ersten Studie wird der Frage nachgegangen, welche Rechenfehler DD typischerweise unterlaufen und inwiefern der Aufgabentyp und die Rechenstrategie eine Rolle bei der Lösung von Mathematikaufgaben spielen. In einer zweiten Studie wird ein Blick auf das Gehirn von Kindern und Jugendlichen geworfen und nach neuronalen Strukturen gesucht, welche sich zwischen Menschen mit und ohne Rechenstörung unterscheiden könnten. Abschliessend werden die Ergebnisse diskutiert, wird ein kritischer Blick auf die Studien geworfen und werden mögliche Schlussfolgerungen gezogen.

An dieser Stelle soll noch erwähnt werden, dass bei der Formulierung stets das männliche Geschlecht verwendet wurde. Selbstverständlich sind damit aber auch alle Mädchen und Frauen eingeschlossen.

Definition. Ein Problem im Verständnis und Umgang mit Dyskalkulie ist, dass weder eine einheitliche Definition noch ein einheitlicher Gebrauch von Begrifflichkeiten vorhanden ist. Folgend soll auf drei verschiedene Klassifikationssysteme hingewiesen werden, um das

Störungsbild und die entsprechenden Begrifflichkeiten näher zu betrachten.

Die Internationale statistische Klassifikation der Krankheiten und verwandter Gesundheitsprobleme (ICD-10; Dilling, Mombour & Schmidt, 2014) geht davon aus, dass das zentrale Defizit einer Rechenstörung grundlegende Fertigkeiten wie Addition, Subtraktion, Multiplikation oder Division betrifft. Die Störung darf nicht durch eine Intelligenzminderung ($IQ < 85$) verursacht sein, weil angenommen wird, dass der Störung eine spezifische biologische Fehlfunktion zugrunde liegt. Um dieser Tatsache gerecht zu werden, wird ein sogenanntes Diskrepanzkriterium angewendet. Dieses besagt, dass zur Diagnosestellung der Leistungsstand des Kindes eindeutig unter dem zu erwartenden Intelligenzalter liegen muss. Erworbene Rechenstörungen (Akalkulie), kombinierte Störungen schulischer Fähigkeiten, Lese- und Rechtschreibstörungen (LRS) sowie Rechenstörungen aufgrund inadäquater Unterrichtung werden von der Diagnosestellung ausgeschlossen.

Beim Diagnostischen und statistischen Leitfaden psychischer Störungen (DSM-5; American Psychiatric Associations, 2013) wird als Kriterium zudem erwähnt, dass nebst den Beeinträchtigungen der Grundrechenarten auch Defizite in anderen Bereichen wie dem Zahlensinn, dem Abruf arithmetischer Fakten oder dem grundlegenden mathematischen Denken angeführt werden müssen. Für eine Diagnosestellung reicht das Vorliegen wesentlicher Schwierigkeiten beim Verständnis von Zahlen, Einprägen arithmetischer Fakten, Rechnen und mathematischen Schlussfolgern. Ein wesentlicher Unterschied zwischen dem DSM-5 und der ICD-10 liegt in der Verwendung des Diskrepanzkriteriums. Die Diskrepanz der Rechenleistung zur Intelligenz ist im DSM-5 als Kriterium nicht vorhanden. Sowohl die ICD-10 wie auch der DSM-5 ordnen die Dyskalkulie neurologisch bedingten Entwicklungsstörungen zu, wo sie als Unterkategorie einer Gruppe von Lernstörungen aufgelistet wird. Die Schwierigkeiten werden als persistent beschrieben und treten bereits früh in der Entwicklung auf, auch wenn die Symptome erst später sichtbar werden.

Für Deutschland und die Schweiz sind auch die S3-Leitlinien der Arbeitsgemeinschaft der Medizinischen Fachgesellschaften (AWMF, 2012) zur Behandlung und Diagnostik der Dyskalkulie relevant. Die Leitlinien haben zum Ziel, empirisch fundierte Handlungsanweisungen für eine vereinheitlichte Diagnostik bereitzustellen. Sie spezifiziert weiter, dass eine Dyskalkulie durch Minderleistungen bezüglich Richtigkeit und Bearbeitungszeit im Bereich der Mathematik (Basiskompetenzen, Grundrechenarten

und/oder Textaufgaben) gekennzeichnet ist.

Begrifflichkeiten. So uneinheitlich die Rechenstörung definiert wird, so unterschiedlich gestalten sich auch deren Begrifflichkeiten. Deshalb wird kurz der Unterschied zwischen einer Rechenschwäche und einer Rechenstörung dargelegt. Laut Fischbach et al. (2013) zeigen rechenschwache Kinder trotz einer im Normbereich liegenden Intelligenz ($IQ > 85$) Rechenleistungen, die deutlich unter der alters- und klassentypischen Leistung liegen. Liegt hingegen die Rechenleistung zusätzlich unter dem individuellen Intelligenzniveau, wird von einer Rechenstörung gesprochen. Der Begriff der Rechenstörung entspricht der Diagnose „Umschriebene Entwicklungsstörungen schulischer Fertigkeiten“ der ICD-10. Diese Unterscheidung zwischen Rechenschwäche und Rechenstörung ist in der Forschung jedoch umstritten, weil keine Unterschiede in den Symptomen beobachtet werden konnten (Ehlert, Schroeders & Fritz-Stratmann, 2012). In der vorliegenden Arbeit werden die Begrifflichkeiten der Rechenstörung und der Dyskalkulie synonym verwendet.

Epidemiologie.

Prävalenz. Die Zahlen zur Häufigkeit von Rechenstörungen variieren je nach Diagnosekriterien und Testverfahren. Laut Fischbach et al. (2013) leiden ungefähr 6 % der Grundschulkinder an einer entwicklungsbedingten Dyskalkulie. Studien, die über einen längeren Zeitraum in unterschiedlichsten Ländern der Welt durchgeführt wurden, berichten relativ breit gestreute, aber erstaunlich einheitliche Prävalenzraten zwischen 3 und 8.4 % (zum Beispiel Gross-Tsur, Manor & Shalev, 1996; Ramaa & Gowramma, 2002). Diese Zahlen entsprechen ungefähr der Vorkommenshäufigkeit der LRS (Reigosa-Crespo et al., 2012). Dass sich die Prävalenzraten je nach angewendeten Kriterien verändern, zeigten Wyschkon, Kohn, Ballaschk und Esser (2009), indem sie unter Anwendung des doppelten Diskrepanzkriteriums von 1.5 Standardabweichungen (SD) und mit Bezug zur Gesamtintelligenz eine Auftretenswahrscheinlichkeit der Rechenstörung von 1.5 % aufzeigten, während die Auftretensrate sich beinahe verdoppelte (2.7 %), wenn das Diskrepanzkriterium auf 1.2 SD abgeschwächt wurde.

Geschlechterverteilung. In Bezug auf die Mathematik scheint in unserer Gesellschaft wohl eher die Meinung vorzuherrschen, dass Mädchen öfters als Jungen von Rechenstörungen betroffen seien. Dass dieser kognitive Mechanismus des Stereotyps sich im Sinne der selbsterfüllenden Prophezeiung bewahrheiten kann, zeigte Osborne (2001). Betrachtet man die allgemeine Mathematikleistung im Grundschulalter, erbringen Mädchen tatsächlich schlechtere Leistungen als Jungen (Niklas & Schneider, 2012). Die Grösse der

Geschlechterunterschiede scheint dabei von den Klassenstufen abhängig zu sein. So zeigte sich, dass die Differenz der Mathematikleistung zwischen Jungen und Mädchen in der achten Klasse grösser war als in der vierten Klasse (Mullis, Martin, Foy & Hooper, 2016).

Betrachtet man hingegen die Studienlage bei vorhandenen Rechenstörungen, zeigt sich das Ergebnisbild als nicht sehr einheitlich. Haase und Krinzing (2019) fassen über mehrere Studien aus verschiedenen Ländern zusammen, dass bei Untersuchungen, die ein einfaches Cut-off-Kriterium verwendeten, höhere Prävalenzraten bei den Jungen resultierten, während jene mit einem Diskrepanzkriterium entweder keine Geschlechterunterschiede oder höhere Prävalenzraten bei Mädchen berichteten. Laut Landerl, Vogel und Kaufmann (2017) sind offenbar ähnlich viele Mädchen wie Jungen betroffen, was, hinsichtlich der höheren Prävalenzraten für Jungen bei anderen Entwicklungsstörungen, bemerkenswert ist. Desoete, Roeyers und De Clercq (2004) zeigten ebenfalls auf, dass die Geschlechterunterschiede mit der Klassenstufe zusammenhingen. So zeigte sich bei Zweit- und Drittklässlern eine leichte Häufung von mathematischen Lernbeeinträchtigungen bei den Mädchen, ab der vierten Klasse dann jedoch bei den Jungen. Es sind aber auch Studien vorhanden, welche ein unausgeglichenes Geschlechterverhältnis in beide Richtungen berichten (Fischbach et al., 2013; Reigosa-Crespo et al., 2012; von Aster, Kucian, Schweiter & Martin, 2005). Bei Schulz et al. (2018) zeigte sich zudem, dass die Schwere der Beeinträchtigungen einen Einfluss auf das Geschlechterverhältnis hat, indem verhältnismässig mehr Mädchen von einer Rechenstörung als einer Rechenschwäche betroffen waren.

Verlauf und Prognose. Um den langfristigen Verlauf von Dyskalkulie aufzeigen zu können, liegen kaum längsschnittlich erhobene Daten vor. Die wenigen vorhandenen Untersuchungen kommen übereinstimmend zum Schluss, dass der Verlauf für Menschen mit einer Dyskalkulie als ungünstig angesehen werden kann (Kohn, Wyschkon, Ballaschk, Ihle & Esser, 2013; Shalev, Manor, Auerbach & Gross-Tsur, 1998; Shalev, Manor & Gross-Tsur, 2005). Die Varianz der numerisch-rechnerischen Leistung scheint in den ersten zwei Schuljahren noch hoch zu sein, was auf eine beschränkte Stabilität der Defizite hinweist, stabilisiert sich dann jedoch ab der zweiten Klasse und zeigt danach eine ausgeprägte Persistenz bis ins Erwachsenenalter (Geary, Hamson & Hoard, 2000; Stern, 2008). Dabei resultierte ein direkter Zusammenhang mit dem Schweregrad der Rechenstörung: je grösser die Beeinträchtigungen zum ersten Messzeitpunkt waren, umso kleiner war die Wahrscheinlichkeit den Rückstand aufzuholen (Shalev, Manor, Auerbach & Gross-Tsur (1998). In Bezug auf das Alter wird jedoch nicht nur ersichtlich, dass die Störung persistiert,

sondern kann beobachtet werden, dass der Verlauf der Störung besonders für jene Kinder signifikant negativer auszufallen scheint, die zum Zeitpunkt der Diagnosestellung schon älter waren (Schulz et al., 2018). In einer Studie von Jordan, Hanich und Kaplan (2003) zeigte sich zudem, dass die veränderten Rechenleistungen über die Zeit auch abhängig von der Mathematikaufgabe/-domäne waren. Dabei resultierte insbesondere der mangelhafte Erwerb des numerischen Faktenwissens als ein pervasives Merkmal von Rechenstörungen. Zudem konnten Kinder mit einer isolierten Rechenstörung den Leistungsrückstand zur Kontrollgruppe (KG) verringern, während die Kinder mit der kombinierten Rechen- und Lesestörung konstant schwache Leistungen zeigten. Ihnen scheinen weniger kompensatorische Mechanismen zur Bearbeitung der Aufgaben zur Verfügung zu stehen (Landerl et al., 2017).

In Bezug auf den Verlauf der Störung taucht denn auch die Frage auf, inwiefern Interventionen, Therapien und Trainings Einfluss nehmen können. Die Frage nach einer nachhaltigen und generalisierbaren Förderung scheint nach wie vor umstritten zu sein. Jedoch zeigen Studien, dass numerisch-rechnerische Interventionsprogramme zur Verbesserung der Zahlenverarbeitung und des Rechnens einen positiven Einfluss sowohl auf Ebene des Verhaltens wie auch der Gehirnaktivität haben (Moeller, Klein & Kaufmann, 2017; Kucian et al., 2011).

Auswirkungen und Langzeiteffekte. Um der Frage nachzugehen, wie trivial Schwächen im Bereich der Mathematik sind, lohnt sich ein Blick auf die Auswirkungen von Rechenstörungen. Denn diese erweisen sich als tiefgreifend und vielfältig, wenn man langfristige negative Effekte untersucht. Menschen mit einer schwachen Rechenleistung scheinen einen niedrigeren sozioökonomischen Status aufzuweisen (Ritchie & Bates, 2013), bei Immobilienkrediten eher in Zahlungsrückstand zu geraten (Gerardi, Goette & Meier, 2013) und selbst das Gesundheitsverhalten kann bei falscher Einschätzung von Gesundheitsrisiken beeinträchtigt sein (Reyna, Nelson, Han & Dieckmann, 2009). Ebenso wird die schulische und berufliche Laufbahn massgeblich beeinflusst, indem der Schulerfolg allgemein tiefer ausfällt (Schulz et al., 2018), seltener eine Berufsausbildung abgeschlossen wird und die Löhne tiefer ausfallen (Parsons & Bynner, 2005). Es verwundert kaum, dass durch wiederholte Misserfolgserlebnisse, trotz möglicherweise grossem Engagement, Stress und Angst vor Mathematik entsteht, was sich wiederum auf weitere kognitive Faktoren auswirkt (Ashcraft & Krause, 2007). Mit einer Dyskalkulie zu leben, bedeutet also nicht nur, nicht rechnen zu können. Vielmehr sind verschiedenste Fertigkeiten betroffen, die gerade für

den Schul- und Berufserfolg, aber auch für das Privatleben wesentlich sind und deren Defizite langfristig viele Nachteile mit sich bringen.

Ätiologie. Bei Dyskalkulie scheint es sich nicht um ein einheitliches Störungsbild, sondern vielmehr um eine komplexe Lernstörung zu handeln. Die Ursachen sind noch nicht vollständig geklärt. Wahrscheinlich beeinflussen sich verschiedene Faktoren gegenseitig und können als Ursache einer Dyskalkulie in Betracht gezogen werden. Folgende Faktoren werden diskutiert, welche in Interaktion miteinander dieses komplexe Störungsbild entstehen lassen.

Gene. Die Untersuchung genetischer Mechanismen, welche einer Rechenstörung unterliegen, werden durch die Komplexität des Phänotyps erschwert (Carvalho & Haase, 2019). Trotzdem scheint die Tatsache, dass die Rechenstörung eine vererbte Prädisposition aufweist, unbestritten zu sein. Eine genetische Verursacherkomponente belegen einige genetisch bedingte Störungen wie das Turner- oder Fragile-X-Syndrom (Landerl, Vogel et al., 2017), oder Kinder mit Spina Bifida (Barnes, Smith-Chant & Landry, 2005) respektive dem Williams-Beuren-Syndrom (Ansari et al., 2003), die häufig eine defizitäre Entwicklung der Rechenleistung aufweisen. Oftmals werden auch Zwillingsstudien aufgeführt. Dabei konnte aufgezeigt werden, dass bei eineiigen Zwillingspaaren die Wahrscheinlichkeit einer Rechenstörung für das eine Kind 12-fach, bei zweieiigen Zwillingen 8-fach erhöht war, wenn das andere dyskalkulisch war (Alarcón, DeFries, Light & Pennington, 1997). Auch bei unterschiedlich alten Geschwistern zeigte sich ein 5 bis 10 Mal erhöhtes Dyskalkulie-Risiko. Zudem hatten 66 % der Mütter, 40 % der Väter und 44 % der Verwandten zweiten Grades von Kindern mit Dyskalkulie ebenfalls eine Rechenstörung (Shalev et al., 2001). Obwohl der Einfluss der Gene auf die Entstehung einer Rechenstörung unbestritten zu sein scheint, konnten bis anhin keine spezifischen Marker, welche für die Unterschiede in der Mathematikfertigkeit aufklären, identifiziert werden (Petrill & Kovas, 2016). Diese berichteten Effekte weisen auf eine moderate bis starke Häufung der Störung innerhalb einer Familie hin. Jedoch kann aufgrund solcher familiären Häufungen nicht zwischen genetischen und umweltbedingten Einflüssen unterschieden werden. Zudem erweisen sich letztendlich doch die umweltbezogenen und kognitiven Faktoren, im Vergleich zur Vererbung, als deutlich bedeutsamer (Tosto et al., 2014).

Neurobiologie. Die ICD-10 und der DSM-5 zählen die Dyskalkulie zu den neurologisch bedingten Entwicklungsstörungen, was darauf hinweist, dass dem beobachtbaren Verhalten Anomalien der Gehirnstruktur und -funktion zugrunde liegen. Mit

den heutigen bildgebenden Verfahren wird es überhaupt erst möglich, neurobiologische Ursachen einer Dyskalkulie genauer zu untersuchen. Untersuchungen kommen zum Schluss, dass bei Dyskalkulie funktionelle und strukturelle Anomalien in einem weitverbreiteten Netzwerk über kortikale und subkortikale Gehirnstrukturen beobachtet werden können und dass diese Gehirnsysteme teilweise überlappen (Fias, Menon & Szucs, 2013). Jedoch reicht dieses Wissen nicht aus, um anhand von Bildgebungen eine Diagnose stellen zu können.

Kognitive Defizite. Heutzutage wird davon ausgegangen, dass verschiedene kognitive Verursachungsfaktoren eine Rechenstörung entstehen lassen (Pennington, 2006). Die kognitiven Fertigkeiten können in zwei Gruppen eingeteilt werden: Einerseits sind dies domänenübergreifende Prozesse wie die phonologische Verarbeitung, das Arbeitsgedächtnis, die Inhibitionskontrolle, visuo-räumliche Fertigkeiten (Geary, Bailey & Hoard, 2009), Speicherung und Abruf im Langzeitgedächtnis, Planungs- und Kontrollfunktionen, allgemeine kognitive Verarbeitungsgeschwindigkeit und motorische Funktionen (Landerl, Vogel et al., 2017), welche mit verschiedenen akademischen Leistungen verbunden sein können und sich nicht auf das Rechnen beschränken. Domänenübergreifende Defizite haben zur Folge, dass verschiedene Bereiche der Informationsverarbeitung und der Aufbau von Wissen erschwert werden (Grube, Busch & Schmidt, 2017). Andererseits spricht man von domänenspezifischen Prozessen, welche sich spezifisch auf die Mathematik beziehen (Fuchs, Geary, Fuchs, Compton & Hamlett, 2014). Die kognitiven Kernmechanismen betreffen die grundlegende Kapazität zum Verständnis von Numerositäten sowie die automatische Verarbeitung von Numerositäten (Landerl, Vogel et al., 2017). Auf diesen basalen Kompetenzen baut die spätere Entwicklung auf. Domänenspezifische Defizite wirken sich auf die Verarbeitung von Mengen und Zahlen aus und erschweren in der Folge das Rechnen und ebenfalls den Aufbau von rechenbezogenem Wissen (Grube et al., 2017).

Umwelt. Umweltfaktoren, die sich auf die mathematischen Fertigkeiten auswirken, können je nach Individuum und Umständen vielseitig sein. Sie beeinflussen die biografischen Lern- und Entwicklungserfahrungen und sind für das Verständnis des Störungsbildes und Behandlungsmöglichkeiten bedeutsam. Häufig erwähnt werden die Lernumgebung und der sozioökonomische Status (Anders et al., 2012). Dabei zeigen Kinder aus finanziell schwächer gestellten Familien bereits in der frühen numerischen Entwicklung mehr Probleme und können Kinder mit guten Kompetenzen oftmals nie mehr einholen (Jordan, Kaplan, Ramineni & Locuniak, 2009). Ein weiterer wichtiger Aspekt wird dem Ausmass und der Qualität der Förderung in der vorschulischen Entwicklung zugeschrieben, was sich wiederum auf die

weitere Entwicklung auswirkt (Niklas & Schneider, 2012). Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist die Mathematikangst. Man geht davon aus, dass Angst vor Versagen sich reaktiv in einem kompetitiven schulischen Bewertungsumfeld entfaltet und die Arbeitsgedächtniskapazität belastet. Dies führt wiederum zu einer verminderten Verarbeitungsgeschwindigkeit, was das Leistungsergebnis beeinträchtigt (Dowker, Sarkar & Looi, 2016). Zudem zeigte sich eine Angstentwicklung durch Modelllernen im Umgang mit mathematikängstlichen Eltern, wenn diese die Kinder bei den Hausaufgaben betreuen (Maloney, Ramirez, Gunderson, Levine & Beilock, 2015) und abhängig von angewendeten Methoden und Lernmaterialien in der Schule (Li & Lappan, 2014).

Mehrfach-Defizit-Modell. Wenn es denn bei der Diagnosestellung und für das umfassende Verständnis einer Rechenstörung sinnvoll ist, einzelne ursächliche Faktoren zu betrachten, so kommt ein Modell mit mehreren interagierenden Defiziten dem Alltag wohl näher. Ein solches Mehrfach-Defizit-Modell (Abbildung 1) stammt von Butterworth und Kovas (2013) und beschreibt die komplexe Interaktion von genetischen, neuronalen, kognitiven und umweltbedingten Faktoren, die sich auf die Verhaltensebene auswirken.

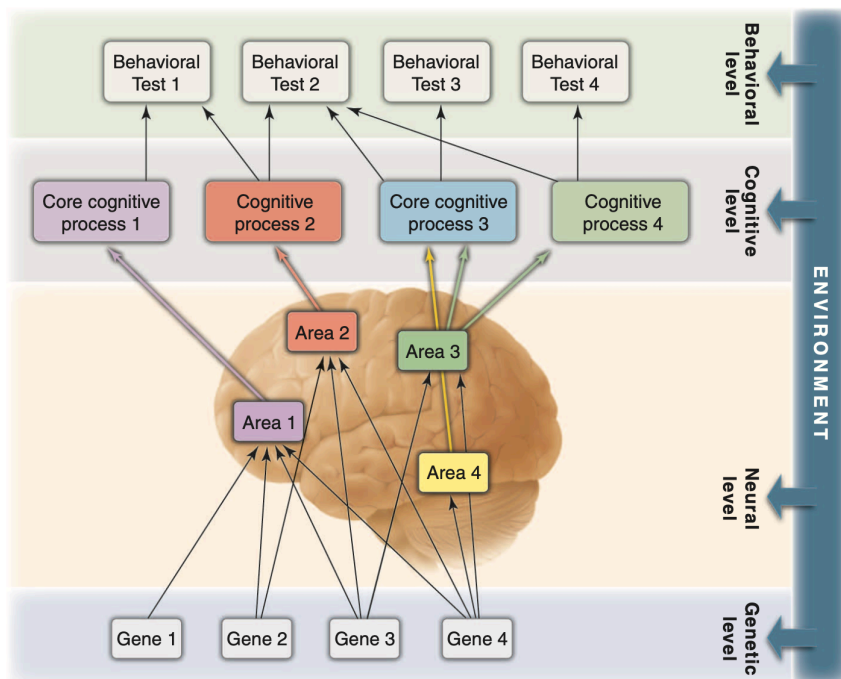


Abbildung 1. Mehrfach-Defizit-Modell von Butterworth und Kovas (2013, S. 302). Zu sehen sind komplexe Interaktionen von genetischen, neuronalen, kognitiven sowie umweltbedingten Faktoren, die sich auf das Verhalten auswirken.

Auf einer biologischen Ebene spielen genetische Risikofaktoren und spezifische Gehirnanomalien eine Rolle, auf der kognitiven Ebene sind relevante psychologische Konstrukte wie das Arbeitsgedächtnis anzutreffen und die Verhaltensebene umfasst beobachtbare Verhaltensweisen. Die verschiedenen Umweltfaktoren wirken auf all diese Faktoren ein. Dabei können verschiedene Beziehungen zwischen und innerhalb von Ebenen bestehen. Wenn man die Dyskalkulie anhand dieses Modells einordnen möchte, so kann auf der neuronalen Ebene ein dysfunktionales fronto-parietales Netzwerk beobachtet werden (Kaufmann, Wood, Rubinsten & Henik, 2011), auf der kognitiven Ebene ein Kerndefizit des Verständnisses und der Verarbeitung von Numerositäten (Butterworth, Varma & Laurillard, 2015) und auf genetischer Ebene wurde anhand von Zwillings- und Familienstudien eine erhöhte Prävalenz innerhalb von Familien festgestellt (Shalev et al., 2001).

Erscheinungsbild. Das klinische Erscheinungsbild von Dyskalkulie ist ziemlich heterogen und äussert sich je nach Person individuell (Bartelet, Vaessen, Blomert & Ansari, 2014). So wird denn auch die typische Symptomatik laut den bereits erwähnten Klassifikationssystemen insgesamt nicht sehr genau charakterisiert. Die kognitiven Defizite lassen sich aufteilen in domänenspezifische Defizite, welche sich spezifisch auf die inhaltliche Domäne der basisnumerischen Verarbeitung beziehen, welche für die Rechenleistung erforderlich ist, sowie in domänenübergreifende Defizite, welche Domänen der kognitiven Verarbeitung betreffen, die nicht nur für die Ausübung von Rechenleistungen erforderlich sind. DD zeigen sowohl Symptome der domänenspezifischen wie auch der domänenübergreifenden Fähigkeiten. Um eine optimale Behandlung für Menschen mit Rechenstörungen anwenden zu können, ist eine differenzierte Erfassung der Symptome deshalb unerlässlich.

Kognitive Defizite.

Domänenspezifische kognitive Defizite. Bei der Entstehung einer Rechenstörung spielen die sogenannten basisnumerischen Defizite eine zentrale Rolle. Die Probleme von DD zeigen sich folglich nicht nur beim Rechnen, sondern bestehen bereits beim Verständnis für Zahlen und Numerositäten, auf dem die Zahlenverarbeitung und das Rechnen aufbauen, wobei die Schwierigkeiten sich mit steigenden Anforderungen potenzieren (Landerl, Vogel et al., 2017). Deshalb gilt diese grundlegende Kapazität als kognitiver Kernmechanismus, der bei einer Rechenstörung beeinträchtigt ist, was dazu führt, dass sich die kognitive Repräsentation von Zahlen und Mengen nicht ordnungsgemäss entwickelt (Landerl, Vogel et al., 2017). Verschiedene Studien weisen darauf hin, dass der basisnumerische Zahlensinn

angeboren ist (Feigenson, Dehaene & Spelke, 2004). Konkret äussern sich typische Symptome hinsichtlich der basisnumerischen Fertigkeiten in Form von mangelhafter Verknüpfung zwischen Zahl und Menge, Schwierigkeiten beim Zählen, Vergleichen von Zahlen und Mengen, der Simultanerfassung kleiner Mengen (Subitizing), dem Einordnen von Zahlen auf dem Zahlenstrahl, dem Verständnis des Stellenwertsystems sowie dem Transkodieren (Haberstroh & Schulte-Körne, 2019). Hinsichtlich der Grundrechenarten äussern sich Schwierigkeiten beim Verständnis von Rechenregeln, dem Aufbau von Faktenwissen und einem fehlenden Übergang von zählenden zu nichtzählenden Rechenstrategien (Haberstroh & Schulte-Körne, 2019).

Domänenübergreifende kognitive Defizite. Aufmerksamkeitsprozesse werden für die verschiedensten kognitiven Prozesse benötigt. Bei DD zeigten sich im Zusammenhang zwischen Verhaltensauffälligkeiten und Lernstörungen Schwächen in der kindlichen Aufmerksamkeit (Landerl, Vogel et al., 2017). Es scheint, dass Beeinträchtigungen der Aufmerksamkeitsregulation ein Risikofaktor für das Lernen und die schulische Leistungsentwicklung darstellen können. Hinsichtlich der exekutiven Funktionen zeigen sich hauptsächlich mangelnde Inhibitionsprozesse (Passolunghi, Marzocchi & Fiorillo, 2005), aber auch schlechtere Updating-Leistungen (Passolunghi & Pazzaglia, 2004) beim Lösen von Textaufgaben. Spezifische Schwierigkeiten resultierten zudem bezüglich dem Shifting, wobei gerade Kinder mit einer komorbid auftretenden Aufmerksamkeits-/Hyperaktivitätsstörung (AD(H)S) Schwierigkeiten beim flexiblen Wechseln zwischen Informationssets aufwiesen (van der Sluis, de Jong & van der Leij, 2004). Häufig beeinträchtigt bei Dyskalkulie ist zudem der Aufbau und Abruf des arithmetischen Faktenwissens (zum Beispiel das Einmaleins) (Haberstroh & Schulte-Körne, 2019). Ebenso wird angenommen, dass durch eine beschränkte Kapazität des verbalen Arbeitsgedächtnisses die Entwicklung der arithmetischen Leistungen negativ beeinflusst wird (Landerl, Vogel et al., 2017). Nebst der begrenzten Kapazität des Kurzzeitspeichers kann auch die sogenannte phonologische Schleife Beeinträchtigungen aufweisen, was sich anhand einer mangelnden Merkleistung durch subvokales Wiederholen von Gedächtnisinhalten äussert (Landerl, Vogel et al., 2017). Die Befundlage in diesem Bereich zeigt sich jedoch heterogen und könnte mit weiteren komorbiden Störungen zusammenhängen (Geary, Hoard & Hamson, 1999; Schuchardt, Maehler & Hasselhorn, 2008). Des Weiteren zeigten sich auch Zusammenhänge zwischen der Mathematikleistung und sprachlichen Kompetenzen. Damit ein Kind Zahlwörter überhaupt lernen kann, müssen sprachliche Fertigkeiten in einem gewissen Masse vorhanden

sein. Diese erwiesen sich für die spätere Zahlenkenntnis und das Verständnis der Zahlwortstruktur als wesentlich (LeFevre et al., 2010). Defizite bei Aufgaben zum visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnis werden in verschiedenen Studien mit DD aufgezeigt. Beispielsweise beim Nachtippen einer Abfolge von Blöcken (Passolunghi et al., 2005) oder bei der Platzierung von Zahlen auf einem Zahlenstrahl (Hubbard, Piazza, Pinel & Dehaene, 2005). Folglich weisen Menschen mit Rechenstörungen Schwierigkeiten auf, räumliche und visuelle Informationen kurzzeitig zu speichern. Aber auch die Fingermotorik sowie die kognitiven Repräsentationen der Finger können Beeinträchtigungen aufzeigen. Die Finger spielen beim Zählprozess eine wichtige Rolle, indem auf zu zählende Objekte gezeigt und Anzahlen abgezählt werden (Butterworth, 1999). Oftmals wird auch ein Zusammenhang der allgemeinen Intelligenz und der Mathematikleistung gefunden, der dann jedoch durch weitere Faktoren wie Sprache, räumliche Verarbeitung oder Zählen erklärt wird (Praet, Titeca, Ceulemans & Desoete, 2013).

Komorbiditäten. Dass Dyskalkulie häufig nicht isoliert, sondern in Kombination mit anderen Störungsbildern auftritt, belegen inzwischen mehrere Studien. Sie scheinen unter anderem in Zusammenhang mit den verschiedenen domänenübergreifenden Symptomen zu stehen und können den Verlauf einer Rechenstörung und Erfolg einer Förderung beeinträchtigen. Deshalb sollten bei einer Dyskalkulie-Abklärung immer auch Komorbiditäten beachtet werden. Vor allem die beiden Störungsbilder LRS und AD(H)S werden in Zusammenhang mit Dyskalkulie häufig beobachtet. In einer Studie von Landerl und Moll (2010) wiesen 40 bis 60 % der Kinder mit Defiziten im Erwerb der Rechenleistungen auch Probleme beim Lesen und/oder bei der Rechtschreibung auf. Interessanterweise scheinen diese beiden Störungsbilder jedoch weitgehend unabhängig voneinander zu sein, wobei die Dyskalkulie mit einem Zahlenverarbeitungsdefizit, die LRS mit einem phonologischen Verarbeitungsdefizit einhergeht (Landerl, Fussenegger, Moll & Willburger, 2009). Belege für das gleichzeitige Vorliegen von Dyskalkulie und AD(H)S lieferten Czamara et al. (2013), welche für Kinder mit AD(H)S ein 2.5-fach erhöhtes Risiko einer defizitären Entwicklung der Rechenleistungen ermittelten. Benedetto-Nasho und Tannock (1999) fanden bei Kindern mit einem AD(H)S, jedoch ohne eine Rechenstörung vermehrte Übertragungsfehler bei schriftlichen Subtraktionen, was normalerweise als Hinweis auf ein unzulänglich verstandenes Stellenwertsystem mehrstelliger Zahlen angesehen werden kann. Hier scheint es sich also um sekundäre Rechenstörungen zu handeln, die nicht primär aufgrund eines basisnumerischen Defizites entstehen. Umgekehrt

erhielten aber auch 26 % der als rechenschwach diagnostizierten Kinder einer israelischen Stichprobe eine AD(H)S-Diagnose (Gross-Tsur et al., 1996). Obwohl Kinder mit AD(H)S häufig Beeinträchtigungen beim Abruf mathematischer Fakten, beim Kopfrechnen oder beim Lösen von Textaufgaben zeigen (Tosto, Momi, Asherson & Malki, 2015), scheinen sich die beiden Störungsbilder trotz teilweiser Überlappung der Symptomatik überwiegend unabhängig voneinander auf basisnumerische und arithmetische Fertigkeiten auszuwirken (Kuhn, Ise, Raddatz, Schwenk & Dobel, 2016).

Weiter erwähnt werden Kinder, die zu früh geboren wurden. Diese weisen ein sehr hohes Risiko auf, Schwierigkeiten beim Rechnen zu entwickeln (Simms et al., 2015). Auch verschiedene sekundäre Komorbiditäten wie internalisierende und externalisierende Auffälligkeiten bei DD werden berichtet (Beitchman & Young, 1997). Zudem können anhaltende Schwierigkeiten beim Rechnen gerade in höheren Klassenstufen in eine negative Einstellung zur Mathematik und nicht selten in eine allgemeine Schulverweigerung und Schulangst münden (Krinzinger, Kaufmann & Willmes, 2009). Eine spezifische Angst gegenüber Mathematik resultiert aufgrund der sich wiederholenden Schwierigkeiten nicht selten. Dabei haben Kucian, McCaskey, O’Gorman Tuura und von Aster (2018) festgestellt, dass diese Ängste nicht nur die mathematische Entwicklung behindern, sondern auch mit einer veränderten Gehirnstruktur bezüglich der Angstverarbeitung einhergehen. Zusammenhänge mit Selbstwertproblemen (von Aster, 2017) erscheinen hinsichtlich der oftmals jahrelangen Misserfolgs- und Frustrationserfahrungen nicht verwunderlich. Gerade die psychischen Folgen sind nicht zu unterschätzen, da sie sich auf weitere Bereiche des Lebens ausweiten und das Wohlbefinden beeinträchtigen können.

Subtypen. Inwiefern Subtypen von Rechenstörungen existieren, wie sie eingeteilt werden können und welche Ursachen ihnen unterliegen, ist weitgehend ungeklärt. Aufgrund des heterogenen Störungsbildes, der uneinheitlichen Definition sowie der verschiedenen Ursachen, welche eine Dyskalkulie entstehen lassen, liegen verschiedene Theorien und Meinungen vor. Drei mögliche Einteilungen werden im Folgenden vorgestellt.

Subtypen je genereller kognitiver Defizite. Geary und Hoard (2005) gehörten zu den ersten Forschern, welche mathematische Beeinträchtigungen und neuropsychologische Defizite in Verbindung zu bringen versuchten. Sie identifizierten drei Subtypen mit entsprechenden kognitiven Beeinträchtigungen. Dem prozeduralen Subtyp unterliegt ein eingeschränktes verbales Arbeitsgedächtnis, welches für den Erwerb von mathematischen Prozeduren notwendig ist, indem Zahlworte repräsentiert und artikuliert und Informationen

im Arbeitsgedächtnis manipuliert werden. Ersichtlich werden entsprechende Defizite beim verzögerten Erwerb einfacher arithmetischer Strategien und von konzeptuellem Wissen. Dem verbal-semantischen Subtyp liegt ein beeinträchtigtes Langzeitgedächtnis zugrunde, welches zur Speicherung und für den Abruf von mathematischen Fakten benötigt wird. Folglich scheint es für betroffene Kinder schwieriger zu sein, arithmetische Fakten zu speichern oder auf diese im Langzeitgedächtnis zuzugreifen. Dieses Defizit zeigt sich als äusserst persistent und kann deshalb als ein entscheidendes Merkmal von Rechenstörungen angesehen werden. Dem visuell-räumlichen Subtyp unterliegt das visuell-räumliche System, welches verschiedene mathematische Kompetenzen (zum Beispiel das Lösen von Geometrieaufgaben oder komplexen Wortproblemen) unterstützt. Liegt in dieser Fertigkeit eine Beeinträchtigung vor, zeigen Kinder Defizite bezüglich der räumlichen Repräsentation von Zahlen, was wiederum Auswirkungen auf die Verarbeitung von Zahlen und das Rechnen hat.

Subtypen je domänenspezifischer numerischer Defizite. Wilson und Dehaene (2007) gehen insgesamt von fünf Subtypen aus, welche alle eine unterschiedliche Ursache aufweisen und zu schweren Beeinträchtigungen der Zahlenverarbeitung und der arithmetischen Leistung führen. Sie betreffen spezifische numerische Defizite. Die ersten beiden Subtypen liegen im Bereich der kognitiven Repräsentationen von Zahlen und können zu sehr basalen Beeinträchtigungen des Verständnisses von Zahlen führen. Dazu gehört eine Beeinträchtigung des Zahlensinns sowie eine Verbindungsstörung zwischen nichtsymbolischen und symbolischen Zahlenrepräsentationen. Drei weitere Subtypen betreffen ein Defizit der verbal-symbolischen Repräsentation, Probleme in den exekutiven Funktionen sowie eingeschränkte räumliche Aufmerksamkeitsprozesse.

Einteilung anhand von Leistungsprofilen. Von Aster (2000) schliesslich hat eine Clusteranalyse von Leistungsprofilen rechenschwacher Kinder durchgeführt und dabei drei verschiedene Subtypen identifiziert. Der tiefgreifende Subtyp zeigte Beeinträchtigungen in allen erhobenen Domänen der Zahlenverarbeitung und des Rechnens, vor allem jedoch im grundlegenden Zahlenverständnis. Häufig wurden dabei Verbindungen zu externalisierenden oder internalisierenden Störungen sowie zu Komorbiditäten mit AD(H)S oder LRS ersichtlich. Der sprachliche Subtyp zeigte hauptsächlich defizitäre Leistungen beim Kopfrechnen, Abzählen und Rückwärtszählen. Häufig wurden zudem Auffälligkeiten in der Sprach- und Schriftsprachentwicklung sowie Aufmerksamkeitsstörungen beobachtet. Der arabische Subtyp äusserte sich beim Lesen oder Schreiben arabischer Zahlen, was sich anhand von Schwierigkeiten beim Transkodieren zwischen dem verbalen und arabischen

Zahlencode offenbarte. Die Defizite zeigten sich besonders in Form von Zahlendrehern (67 statt 76) und Problemen der Erfassung des Stellenwertsystems der arabischen Zahlennotation.

Die verschiedenen Konzepte weisen Unterschiede und Gemeinsamkeiten auf. Bis heute konnte jedoch kein einheitliches Konzept für Subgruppen bestätigt werden.

Entwicklung der Zahlenverarbeitung und des Rechnens

Um die Komplexität und Vielgestaltigkeit des Störungsbildes verständlicher darstellen zu können, ist es erforderlich, vorerst die typische Entwicklung der Zahlenverarbeitung und des Rechnens zu betrachten. Denn Störungen von Reifungsprozessen, welche der Dyskalkulie zugrunde liegen, können in verschiedenen Entwicklungsstadien unterschiedliche Komponenten der Entwicklung dieses komplexen kognitiven Systems betreffen und die Vielgestaltigkeit des Störungsbildes erklären. Der Erwerb mathematischer Kompetenzen erweist sich als ein komplexer Prozess, der lange vor der formalen Beschulung beginnt (Dehaene, 2011). Es scheint gar, dass ein Teil des menschlichen Quantifizierungssystems einen evolutionären Ursprung hat, wie Studien an Tieren zeigten (Jordan & Brannon, 2003; Brannon & Terrace, 2000). Säuglingsstudien verweisen zudem darauf, dass basale mathematische Fertigkeiten schon sehr früh vorhanden sind. Diese frühen Kompetenzen und Entwicklungen sollen im Folgenden beschrieben werden. Danach wird auf weitere ausgewählte Entwicklungsschritte und Modelle eingegangen.

Entwicklung von frühem numerischem Wissen. Spezifische Kenntnisse und Fertigkeiten beim Erwerb von mathematischen Kompetenzen werden häufig mit der Unterstützung von angeborenen Fähigkeiten (Basiskompetenzen) erworben. Diese können unter dem Begriff Zahlensinn zusammengefasst werden (Dehaene, 2011). Aus Sicht der kognitiv orientierten Entwicklungspsychologie wird auch von *Kernsystem* gesprochen (Spelke & Kinzler, 2007). Dieses Kernsystem bildet die genetisch determinierte Grundlage für alle weiteren sich entwickelnden Leistungen bezüglich Zahlenverarbeitung und Arithmetik. Eine Komponente dieses frühen Mengenwissens äussert sich in einer Sensibilität für Anzahlen, wobei das Schätzen von kleinen Mengen bis zu drei Elementen exakt, bei grösseren Mengen zunehmend genauer gelingt (Feigenson, Carey & Spelke, 2002). Je nach Alter verändert sich zudem die Diskriminierungsfähigkeit (Xu & Spelke, 2000). Ein weiteres Element ist das nonverbale mentale Modell, das als abstrakte Repräsentation von Elementen einer Menge angesehen werden kann. Dabei werden unwichtige Merkmale wie Form, Grösse oder Farbe ausser Acht gelassen, während wichtige numerische Informationen genau

repräsentiert werden (Peucker & Weißhaupt, 2017). Des Weiteren wird das Subtizing dazu gezählt. Auf einen Blick können ein bis vier Elemente exakt erfasst werden, ohne dass dafür gezählt werden muss (Fuson, 1992). Schliesslich werden protoquantitative Schemata zum Zahlensinn dazu gezählt. Diese können als intuitives Wissen beschrieben werden, das Kinder aus dem Alltag lernen und das ein nicht-numerisches Denken über Beziehungen zwischen Mengen erlaubt. Unterschieden werden Schemata des Vergleichs, Schemata des Vermehrens und Verminderns oder das Teile-Ganzes-Schema (Resnick, 1992). Leibovich und Henik (2013) entwickelten zudem ein Modell, welches die Beziehung zwischen einer Menge und ihrer räumlichen Ausdehnung über die Entwicklung hinweg beschreibt. Sie gehen davon aus, dass die Fähigkeit, zwischen kontinuierlichen Eigenschaften (visuelle Merkmale wie beispielsweise die Oberfläche oder Dichte von dargestellten Mengen) unterscheiden zu können, angeboren ist. Im weiteren Entwicklungsverlauf können diskrete (Numerositäten) und kontinuierliche Eigenschaften in Beziehung gesetzt werden, was das Schätzen von Mengen erlaubt. Im Rahmen der formellen Beschulung wird es dann möglich, exakte Unterschiede zwischen verschiedenen Mengen zu repräsentieren.

Wie gut der Zahlensinn bei einem Menschen insgesamt ausgebildet ist, gilt als Schlüsselrolle für den späteren Schulerfolg. Liegen bereits Defizite bei Komponenten dieses frühen Mengenwissens vor, können diese als Ursache für das Bestehen einer Dyskalkulie angesehen werden (Butterworth, 2011).

Zählen. Die Entwicklung der Zählfertigkeit stellt ein wichtiger Entwicklungsschritt dar, die normalerweise bis zum Eintritt in den Kindergarten erworben wurde. Um zählen zu können, sind Kenntnisse über Zahlwörter erforderlich. Im Zuge der Sprachentwicklung erlernen Kinder erst einmal die Zahlwortreihe. Zudem lernen Kinder über die ersten Jahre ihrer Entwicklung hinweg, räumliche Mengen und Numerositäten in einen Zusammenhang zu bringen, was eine exakte Unterscheidung von verschiedenen Mengen erlaubt (Leibovich & Henik, 2013). Der Erwerb des Zählens ist deshalb massgebend, weil einerseits die Zuordnung von Zahlwörtern zu entsprechenden Numerositäten die erste symbolische Repräsentation von Numerositäten darstellt und andererseits Zählen die Grundlage für die Entwicklung früher Rechenoperationen ist (Landerl, Vogel et al., 2017). Gelman und Gallistel (1978) unterscheiden folgende zentrale Zählprinzipien:

Wie man zählt: Jedem zu zählenden Objekt kann genau ein Zahlwort zugeordnet werden (Eins-zu-Eins-Prinzip). Die Zahlwörter werden dabei in einer konsistenten Abfolge verwendet (Prinzip der stabilen Abfolge) und das letzte Wort des Zählprozesses repräsentiert

schliesslich die Mächtigkeit der Menge (Kardinalitätsprinzip).

Was man zählen kann: Die Items können in jeder beliebigen Reihenfolge gezählt werden und ergeben immer dasselbe Ergebnis, solange das Eins-zu-Eins-Prinzip eingehalten wird (Prinzip der Irrelevanz der Abfolge). Dabei spielt es keine Rolle, was gezählt wird (Prinzip der Irrelevanz des Zählinhaltes).

Symbolische Repräsentationen. Menschen entwickeln auch sprachgebundene visuelle (schriftliche) Repräsentationen für Anzahlen, was eine exakte Bestimmung von Mengengrössen und das Zählen ermöglicht (Grond, Schweizer & von Aster, 2013). Dabei können symbolische Notationen von Numerositäten in Form von Zahlwörtern oder arabischen Zahlen repräsentiert und anhand von Aufgaben des Zahlengrössenvergleichs untersucht werden. Um entscheiden zu können, welche von zwei Zahlen die numerisch grössere Menge abbildet, muss verstanden werden, welche Menge die jeweiligen Zahlen symbolisch abbilden (Symbol – Menge). Dieses Verständnis zeigt, wie gut die Zahlensemantik von Zahlwörtern verstanden wurde. Es scheint, dass im Laufe der Entwicklung die nonsymbolischen mit den symbolischen Repräsentationen zunehmend verknüpft werden (Dehaene & Cohen, 1997). Verschiedene Studien weisen darauf hin, dass Repräsentationen für Quantitäten räumlich anhand einer internen mentalen Grössenrepräsentation (mentaler Zahlenstrahl) dargestellt werden können. Drei Phänomene beschreiben den mentalen Zahlenstrahl. Der Distanzeffekt (Moyer & Landauer, 1967) zeigt, dass bei der Entscheidung, welche von zwei Zahlen die grössere ist, die Antwort schneller und mit weniger Fehlern ausfällt, je weiter auseinander die Zahlen liegen. Der Grösseneffekt beschreibt, dass bei gleichbleibender Distanz zwischen zwei Zahlenpaaren die Reaktionszeit und Fehlerzahl mit wachsender Grösse der Zahlen zunimmt (Buckley & Gillman, 1974). Zudem wird aufgrund des SNARC-Effekts (Spatial Numerical Association of Response Codes) ersichtlich, dass bei der Entscheidung, ob eine Ziffer kleiner oder grösser als eine vorgegebene Zahl ist, die Reaktionszeiten der linken Hand bei kleinen und die der rechten Hand bei grossen Zahlen kürzer resultieren. Dies spricht für einen mentalen Zahlenstrahl, der in Schreibrichtung ausgerichtet ist (Dehaene, Bossini & Giraux, 1993). Zahlenstrahlaufgaben sind Aufgaben, bei denen innerhalb eines definierten Zahlenbereichs (zum Beispiel zwischen 0 und 100) erfragte Zahlen eingezeichnet werden sollen. Diese zeigen interessanterweise einen typischen Entwicklungsverlauf von logarithmisch hin zu linear, indem Kinder der zweiten Schulstufe dazu neigen, kleine Zahlen zu überschätzen, im grossen Zahlenraum hingegen zu unterschätzen, während Kinder der vierten Schulstufe Zahlen auf dem

Zahlenstrahl bereits gut einzuschätzen wissen (Opfer & Siegler, 2007). Eine weitere Entwicklung im Rahmen der symbolischen Repräsentationen stellt der Erwerb des Stellenwertsystems respektive der Syntax sowie des Transkodierens dar. Mit den Ziffern 0 bis 9 können unendlich viele Zahlen gebildet werden. Um das Stellenwertsystem jedoch zu erwerben, muss verstanden werden, dass die gleiche Ziffer je nach Position innerhalb einer Zahl eine unterschiedliche numerische Bedeutung hat.

Fingerrechnen. Bei der frühen Form von zählendem Rechnen ist es üblich, dass Kinder die Finger als Hilfsmittel verwenden. Dabei können verschiedene Strategien angewendet werden: Jeder Operand wird anhand der entsprechenden Fingeranzahl abgezählt (count-all), vom ersten Operanden an wird weitergezählt (count-from-first-addend) oder bei der effizientesten Form wird der grössere Addend bestimmt und der kleinere Addend dazugezählt (count-min) (Siegler & Jenkins, 1989). Welche der Strategien Kinder anwenden, ist stark übungsabhängig und im Verlauf wechseln die meisten Kinder automatisch zur effizienteren Strategie oder verfügen über mehrere Strategien gleichzeitig.

Arithmetischer Faktenabruf und Strategien. Das zählende Rechnen geht über das wiederholte Errechnen von Ergebnissen (zum Beispiel des Einmaleins) in den Faktenabruf über, indem Assoziationen zwischen Rechnungen und Antworten gebildet werden. Verschiedene Faktoren scheinen zum Aufbau des Faktenwissens beizutragen, deren Zusammenspiel jedoch wenig erforscht ist (Landerl, Vogel et al., 2017). Die Entwicklung der verschiedenen Strategien von langsamen und fehleranfälligen hin zu effizienten und fehlerresistenten Strategien scheint sich dabei graduell zu verändern: in einem bestimmten Alter steigt die Wahrscheinlichkeit, eine bestimmte Strategie für bestimmte Aufgaben anzuwenden, aber früher erworbene Strategien sind ebenfalls noch verfügbar (Siegler, 1996). Der Faktenabruf folgt also nicht dem Alles-oder-nichts-Prinzip, sondern zeigt sich individuell bezüglich der Strategien, die für bestimmte Aufgaben angewendet werden.

Zahlenverarbeitung und Rechnen bei Kindern mit Rechenstörungen

Bisher wurden einige Befunde zur Entwicklung von mathematischen Fertigkeiten sowie zur Zahlenverarbeitung bereits angesprochen. Wissenschaftliche Untersuchungen im Bereich der Zahlenverarbeitung und des Rechnens haben sich lange Zeit hauptsächlich mit Erwachsenen auseinandergesetzt und verschiedene Teilkomponenten der Zahlenverarbeitung und der arithmetischen Leistungen beschrieben. Erst in den vergangenen Jahren wurden auch Kinder etwas häufiger in den Fokus der Forschung gerückt. In einem nächsten Schritt sollen deshalb die wichtigsten Kenntnisse zu den Teilkomponenten des Rechnens bei Kindern mit

einer Rechenstörung beschrieben werden.

Für Kinder, die bereits mit einem tieferen mathematischen Ausgangsniveau in die Schule starten, wird es im weiteren Verlauf immer schwieriger, die Lücken zu füllen. Dass Kinder mit Dyskalkulie über keine soliden Basiskompetenzen verfügen und Schwierigkeiten hinsichtlich des Erwerbs und der Anwendung von Rechenstrategien aufweisen, zeigte Siegler (1996) in Vergleichsuntersuchungen. Auffälligkeiten zeigten sich bei DD zudem bezüglich dem Mengen- und Zahlengrössenvergleich aufgrund von erhöhten Reaktionszeiten (Landerl, 2013). Szucs und Goswami (2007) berichteten dabei einen grösseren Distanzeffekt bei den DD. Die Befundlage des defizitären symbolischen Zahlengrössenvergleichs fällt insgesamt konstant aus, während sie sich für nonsymbolische Mengenvergleiche uneinheitlicher gestaltet (De Smedt, Noël, Gilmore & Ansari, 2013; Schneider et al., 2017). Bei DD scheint weiter der Zählprozess beeinträchtigt und der Subtizing-Bereich eingeschränkt zu sein, was sich einem steileren Reaktionszeitenanstieg äussert (Reeve, Reynolds, Humberstone & Butterworth, 2012). Weitere Defizite betreffen Mengenvergleichsaufgaben und Zahlenstrahlaufgaben (Xenidou-Dervou, Molenaar, Ansari, van der Schoot & van Lieshout, 2017) sowie Schwierigkeiten beim Transkodieren von Zahlwörtern in Ziffern und im Umgang mit mehrstelligen Zahlen (Geary et al., 1999; Geary et al., 2000). Typischerweise kann auch ein defizitäres numerisches Faktenwissen als persistierendes Merkmal beobachtet werden (Geary & Hoard, 2005). Offenbar scheint der Übergang vom zählenden Rechnen hin zum direkten Abruf arithmetischer Fakten aus dem Gedächtnis nicht zu gelingen, unreifere Strategien wie Fingerrechnen werden häufiger verwendet und es resultieren häufiger Zählfehler (Landerl, Vogel et al., 2017). Sind Rechenstörungen tatsächlich genetisch determiniert, dürften sich bestimmte Symptome bereits vor dem Schulalter bemerkbar machen. Noch gibt es wenige Kenntnisse der vorschulischen Entwicklung von Kindern mit Dyskalkulie. Erste Hinweise liefern von Aster, Schweiter und Weinlauf-Zulauf (2007) bezüglich defizitären Zählfunktionen, Mazzocco und Thompson (2005) hinsichtlich Zahlenvergleich und Benennen sowie Geary, Bow-Thomas und Yao (1992) betreffend der Zählabfolge.

Entwicklungsmodelle der Zahlenverarbeitung und des Rechnens

Worin genau die Grundlage des Zahlensinns beim Menschen besteht, ist in der Wissenschaft bis heute umstritten. Butterworth (2011) beispielsweise geht von einem angeborenen approximativen Zahlensystem aus, welches die Verarbeitung von nicht symbolischen Numerositäten (zum Beispiel Punktemengen) ermöglicht. Dieser Annahme

widersprechen Leibovich und Henik (2013). Ihrer Meinung nach sollten solche Theorien des frühen Mengenwissens kontinuierliche Eigenschaften von Mengen mitberücksichtigen, welche dazu beitragen, im Laufe der Entwicklung verschiedene Mengen voneinander unterscheiden zu können. Im Hinblick auf diese kontrovers diskutierten Inhalte sollen in einem nächsten Schritt anhand von neuropsychologischen Modellen Kenntnisse der numerischen Entwicklung sowie der Zahlenverarbeitung vereint werden.

Entwicklungsmodelle zu betrachten ist wichtig, wenn man das Störungsbild der Dyskalkulie sowie mögliche Verläufe, die Diagnostik und Interventionsansätze verstehen und anwenden möchte. Eines der einflussreichsten anatomisch-funktionellen Rechenmodelle, welches auf Patientenstudien und ersten bildgebenden Verfahren beruht, ist das Triple-Code Modell von Dehaene und Cohen (1995). Es beschreibt, dass Zahlen vom Gehirn in drei unterschiedlichen Modalitäten verarbeitet werden können: verbal (gesprochene oder geschriebene Zahlwörter), visuell (arabische Ziffern) sowie anhand amodaler semantischer Bedeutung (ungefähre Grössenrepräsentation des mentalen Zahlenstrahls). Diese drei Zahlenaspekte können ineinander überführt (Transkription) und jede der Modalitäten kann einem bestimmten Gehirngbiet zugeordnet werden. Die verbale Verarbeitung von Zahlen wird den perisylvischen Arealen zugeordnet, jener Hirnregion, die auch für die Sprachfunktionen wichtig ist. Die Verarbeitung der visuell-arabischen Zahlenform wird durch okzipitale Hirnregionen, also visuelle Areale, unterstützt. Das neuronale Korrelat der semantischen Grössenrepräsentation entspricht dem Parietallappen (intraparietaler Sulcus, IPS). Weil die heutigen Kenntnisse ein genaueres Bild der neuronalen Repräsentation der Zahlenverarbeitung aufzeigen und weil das Triple-Code Modell ein Erwachsenenmodell darstellt und das zugrundeliegende Wissen anhand von Funktionsausfällen bei Patienten gewonnen wurde, eignet sich das Modell nicht wirklich, um Entwicklungsverläufe oder Entwicklungsstörungen erklären oder beschreiben zu können. So haben von Aster und Shalev (2007) versucht, Daten aus Entwicklungsstudien mit dem Triple-Code Modell in Einklang zu bringen (Abbildung 2). Sie gehen von vier Entwicklungsstufen aus, in denen durch das Hinzukommen neuer Modalitäten eine immer komplexere kognitive Repräsentation von Zahlen möglich wird und neue Fähigkeiten ausgebildet werden können. Auf der ersten Stufe stehen die Entwicklung des Subtizing, der approximativen Zahlenverarbeitung und der Zahlenvergleiche. Auf der zweiten Stufe lernen Klein- und Vorschulkinder Zahlwörter und Zählstrategien und auf der dritten während der ersten Schuljahre das arabische Zahlensystem. Auf der vierten Stufe schliesslich entwickelt sich ein exakter linearer mentaler Zahlenstrahl.

Auf jeder Stufe nimmt die notwendige Arbeitsgedächtniskapazität zu. Dabei entwickeln sich die Repräsentationen jeder Modalität bis ins frühe Erwachsenenalter weiter und verfeinern sich. Die einzelnen Modalitäten überlappen immer stärker und stehen zunehmend enger in Verbindung zueinander. Von Aster und Shalev (2007) weisen den unterschiedlichen Entwicklungsschritten dann auch unterschiedliche beteiligte Hirnareale zu, welche sich über die Entwicklung verändern. Dabei werden analoge Größenrepräsentationen (zum Beispiel mentaler Zahlenstrahl) mit bilateralen Arealen des IPS respektive mit posterior parietalen Arealen assoziiert, verbale Zahlenrepräsentationen mit linkshemisphärischen Spracharealen sowie dem Gyrus angularis und Repräsentationen der visuell-arabischen Zahlenform mit sensorischen Arealen wie dem Gyrus fusiformis.

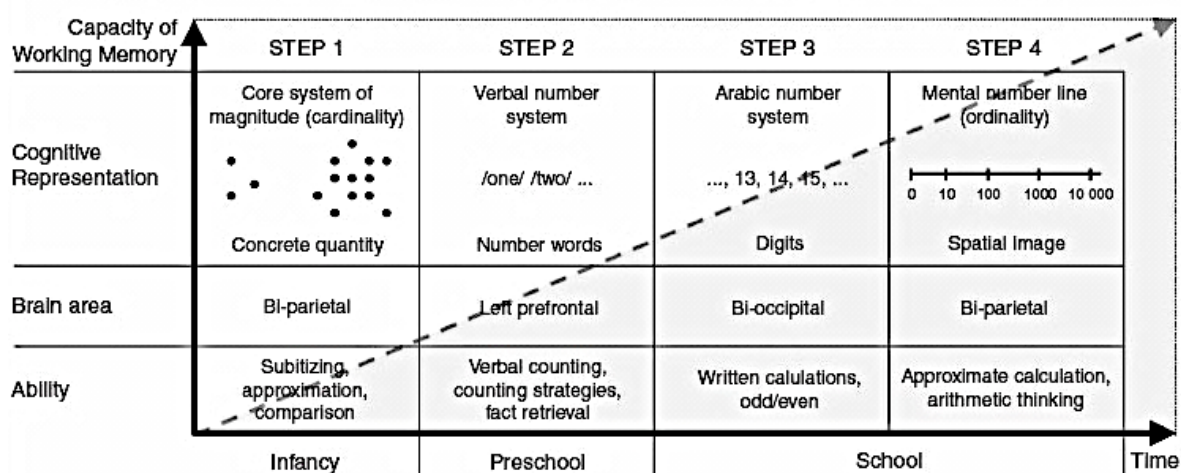


Abbildung 2. Vier-Stufen-Modell der Entwicklung numerischer Kognition (von Aster & Shalev, 2007, S. 870). Zu sehen sind die verschiedenen Entwicklungsschritte über die Zeit.

Neuronale Grundlagen und Korrelate der typischen Entwicklung

Nachdem das Störungsbild der Dyskalkulie, die Entwicklung der Zahlenverarbeitung und des Rechnens sowie Befunde zur Zahlenverarbeitung beschrieben wurden, soll ein wichtiger Bestandteil der neueren Forschung hinzugefügt werden: die neuronalen Grundlagen, welche mit der Zahlenverarbeitung und dem Rechnen in Verbindung stehen. Neurokognitive Befunde legen eine Differenzierung in Teilfunktionen nahe und beschreiben spezifische neuronale Korrelate von Rechenstörungen. Gerade die Errungenschaft von bildgebenden Verfahren trug zu erweitertem Wissen bei. Viele dieser Studien wurden mit gesunden Erwachsenen durchgeführt, weshalb eine Generalisierung auf das sich noch

entwickelnde Gehirn und auf Menschen mit Rechenstörungen mit Vorsicht in Betracht gezogen werden soll (Ansari, 2010). Das sich entwickelnde Gehirn unterliegt keinem statischen, sondern vielmehr einem dynamisch plastischen Prozess und sowohl Gehirnstrukturen wie auch -funktionen zeigen deutliche Veränderungen, angetrieben von Umweltfaktoren wie Bildung (Johnson & de Haan, 2011). Erste Kenntnisse der neuronalen Grundlagen der Zahlenverarbeitung und des Rechnens wurden in den Entwicklungsmodellen von Dehaene und Cohen (1995) sowie von Aster und Shalev (2007) angesprochen. Im Folgenden werden nun die Gehirnnetzwerke beschrieben, welche die numerischen Fertigkeiten unterstützen. Dabei soll spezifisch auf die Unterschiede zwischen Erwachsenen und Kindern sowie auf Entwicklungsveränderungen über die Zeit eingegangen werden, während der Fokus auf dem kindlichen Gehirn liegt. Wichtig zu erwähnen ist, dass die Verarbeitung von Zahlen beziehungsweise das Rechnen ein Zusammenspiel von verschiedenen Hirnregionen erfordert, weshalb ein weitverbreitetes Netzwerk aktiv ist, welches sich über das gesamte Gehirn erstreckt (Peters & De Smedt, 2018). Solch ein Netzwerk ist in Abbildung 3 von Kucian (2016) dargestellt.

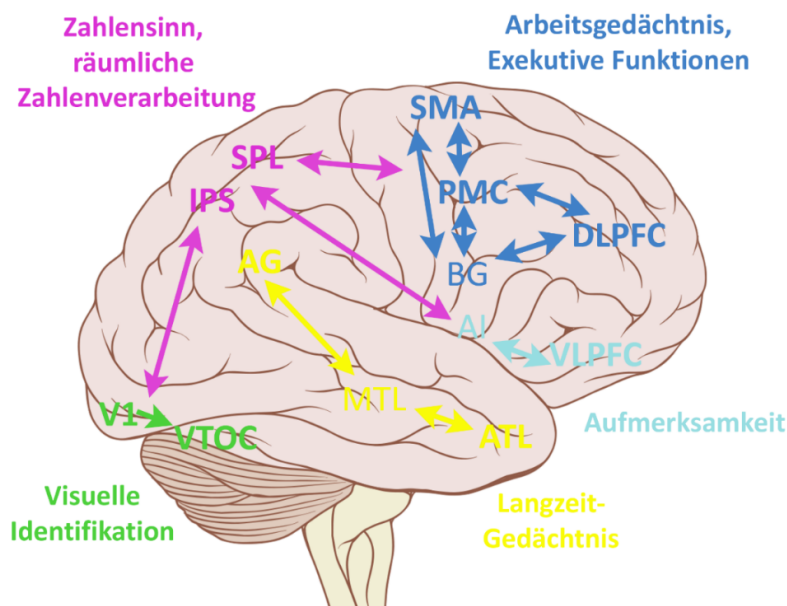


Abbildung 3. Neuronales Netzwerk der Zahlenverarbeitung. Dazu gehören der IPS (intraparietaler Sulcus), SPL (superiorer Parietallappen), V1 (primär visueller Kortex), VTOC (ventrotemporaler Okzipitalkortex), AG (Gyrus angularis), MTL (medialer Temporallappen), ATL (anteriorer Temporallappen), PMC (prämotorischer Kortex), DLPFC (dorsolateraler Präfrontalkortex), VLPFC (ventrolateraler Präfrontalkortex), die BG (Basalganglien), AI (anteriore Insula) und das SMA (supplementäres motorisches Areal) (Kucian, 2016, S. 174).

Das neuronale Netzwerk beinhaltet als Kerngebiet der numerischen und rechnerischen Verarbeitung den IPS und superioren Parietallappen. Aber auch Hirngebiete wie der primär visuelle Kortex und der ventrale Okzipitalkortex werden für die visuelle Identifikation von Mengen und Zahlen benötigt, während der Gyrus angularis und der mediale und anteriore Temporallappen mit dem Faktenabruf aus dem Langzeitgedächtnis in Verbindung stehen. Zudem sind eine Vielzahl an frontalen Regionen wie das supplementäre motorische Areal, der prämotorische Kortex, der dorsolaterale und ventrolaterale Präfrontalkortex sowie die Basalganglien in Bezug auf übergreifende kognitive Prozesse in das Netzwerk eingebunden.

Entwicklungsveränderungen. Inwiefern sich neuronale Aktivierungen beim Lösen von numerischen oder rechnerischen Aufgaben zwischen Erwachsenen und Kindern unterscheiden, ist noch nicht vollständig geklärt. Während Studien zum Gehirn Erwachsener sozusagen den Endzustand der Entwicklung aufzeigen, verweisen Untersuchungen bei Kindern auf Fertigkeiten und Korrelate, die noch in Entwicklung sind. Einige Untersuchungen berichteten vergleichbare parietale Aktivierungen (zum Beispiel Cantlon, Brannon, Carter & Pelphrey, 2006), während andere Studien zum Schluss kommen, dass die Stärke der zahlenspezifischen Aktivierungen im bilateralen (intra-)parietalen Kortex mit dem Alter zunimmt (zum Beispiel Vogel, Remark & Ansari, 2015). Weiter belegen verschiedene Untersuchungen eine linkshemisphärische Spezialisierung für die Repräsentation von Zahlensymbolen im Entwicklungsverlauf (zum Beispiel Emerson & Cantlon, 2015). Kinder zeigen zudem eine stärkere Aktivierung frontaler Hirnregionen während Zahlenvergleichsaufgaben, was auf vermehrte Arbeitsgedächtnis- und Aufmerksamkeitsressourcen zur Bewältigung der Aufgaben hinweisen könnte (De Smedt, Peters & Ghesquière, 2019). Rosenberg-Lee et al. (2015) zeigten dabei auf, dass die numerische Entwicklung mit einer systematischen Verschiebung der neuronalen Aktivität von frontalen zu (intra-)parietalen Arealen assoziiert ist, was als zunehmende Spezialisierung und Automatisierung der Verarbeitung numerischer Information im Parietallappen interpretiert werden kann, während domänenübergreifende unterstützende Prozesse mit der Zeit weniger in Anspruch genommen werden müssen. Diese Aktivitätsverschiebungen von weitverteilten zu spezifischen funktionellen Netzwerken können als reifungsbedingte Veränderungen angesehen werden und zeigen die allmähliche Entwicklung neuronaler Netzwerke über die Zeit auf. Weiter zeigte sich bei Kindern während der Anwendung von Rechnungsprozeduren ebenfalls eine erhöhte Aktivität im bilateralen IPS und Präfrontalkortex (Polspoel, Peters, Vandermosten & De Smedt, 2017). Im Unterschied zu den

Erwachsenen ging der Faktenabruf mit erhöhter Aktivität des medialen Temporallappens, insbesondere des linksseitigen Hippocampus, einher, der bei Erwachsenen von einer erhöhten Aktivität im Gyrus angularis begleitet war (Menon, 2016). Der Unterschied zwischen Kindern und Erwachsenen könnte mit der zeitlimitierten Rolle des Hippocampus für das Langzeitgedächtnis erklärt werden, indem arithmetische Fakten erst konsolidiert werden müssen, während sie später automatisiert abgerufen werden können (Smith & Squire, 2009).

Kinder. Was geschieht im Gehirn von Kindern, wenn sie rechnen lernen? Die erfahrungsabhängige Plastizität beschreibt, wie Gehirngebiete sich verändern und zunehmend erweiterte Funktionen zeigen, während Kinder Fertigkeiten wie das Rechnen erlernen (Johnson & de Haan, 2011). Folgend werden die erworbenen Kenntnisse der Gehirnfunktion, Gehirnstruktur und Konnektivität bei Kindern in Bezug auf mathematische Fertigkeiten beschrieben.

Gehirnfunktion. Anhand der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) können Hirnregionen visualisiert werden, welche beim Lösen bestimmter Aufgaben beteiligt sind. Nebst den bereits erwähnten funktionellen Kenntnissen, berichteten Kawashima et al. (2004) weiter, dass Kinder während dem Lösen von Additions-, Subtraktions- sowie Multiplikationsaufgaben präfrontale, intraparietale und okzipito-temporale Gehirnareale rekrutieren. Eine der ersten fMRT-Studien, welche die Rechenleistung von Additions- und Subtraktionsaufgaben im typischen Entwicklungsverlauf von 8- bis 19-Jährigen untersucht haben, stammt von Rivera, Reiss, Eckert und Menon (2005). In ihrer Untersuchung zeigten sie auf, dass die Aktivierung von zahlenrelevanten Bereichen in (intra-)parietalen Hirnregionen altersabhängig ist und jüngere Kinder eine geringere Aktivierung aufwiesen, was auf die weniger gefestigte numerische Grössenrepräsentation respektive eine kürzere Beschulung zurückgeführt werden dürfte.

Gehirnstruktur. Bei der Untersuchung der Gehirnstruktur werden neuroanatomische Unterschiede der strukturellen grauen und weissen Hirnsubstanz (GM und WM) quantitativ erfasst. Dabei weist die GM auf die Integrität der Nervenzellkerne, die WM auf die Faserverbindungen hin. Eher wenige Studien haben den Zusammenhang zwischen GM und Rechenfertigkeiten bei typisch entwickelten Kindern untersucht. Signifikant positive Korrelationen wurden zwischen dem Volumen der GM des linksseitigen IPS und der Rechenleistung berichtet (Li, Hu, Wang, Weng & Chen, 2013; Price, Wilkey, Yeo & Cutting, 2016). Zudem zeigten Supekar et al. (2013), dass ein grösseres Volumen des rechten Hippocampus einen grösseren Zugewinn durch ein Rechentraining bezüglich effizienten

Zählstrategien und Faktenabruf vorhersagen konnte. Evans et al. (2015) schliesslich berichteten, dass das Volumen der GM verschiedener Gebiete des arithmetischen Netzwerkes (posterior parietale Gebiete und ventraler okzipito-temporaler Kortex) über die gesamte Primarschulzeit hinweg mit dem Zuwachs von Rechenfertigkeiten in Verbindung stand. All diese Resultate bestätigen, dass die strukturelle Integrität verschiedener Teile des arithmetischen Netzwerkes positiv mit der arithmetischen Leistung korreliert ist.

Konnektivität. Dass das berichtete neuronale Netzwerk während des Rechnens aktiv ist, legt nahe, dass anstatt einzelner Gehirnregionen möglicherweise bevorzugt die funktionelle und strukturelle Konnektivität zwischen diesen Gehirnregionen untersucht werden sollte (Uddin et al., 2010). Untersuchungen mit der Methode der aufgabenbasierten Konnektivität zeigten die Wichtigkeit von fronto-parietalen (Chang, Metcalfe, Padmanabhan, Chen & Menon, 2016; Rosenberg-Lee et al., 2015), hippocampal-frontalen (Cho et al., 2012; Qin et al., 2014) und hippocampal-parietalen (Qin et al., 2014) Konnektivitäten. Dabei resultierte während dem Lösen von Additionsaufgaben eine erhöhte funktionelle Konnektivität zwischen dem linksseitigen dorsolateralen Präfrontalkortex und posterior parietalen Gehirngebieten im Verlauf von der zweiten zur dritten Klasse (Rosenberg-Lee et al., 2015). Mit zunehmendem Alter und folglich zunehmendem Faktenabruf konnte des Weiteren eine erhöhte hippocampal-präfrontale Konnektivität beobachtet werden (Cho et al., 2012). Interessanterweise sagte viel eher die Veränderung der hippocampalen Konnektivität als regionale Veränderungen des Hippocampus die Leistung des Faktenabrufs voraus (Qin et al., 2014). Dies weist auf einen Zusammenhang zwischen der Zunahme des arithmetischen Faktenabrufs und der funktionellen Konnektivität hippocampal-neokortikaler Netzwerke hin. Studien, welche die Konnektivität in Ruhe untersuchten, zeigten zudem anhand einer erhöhten intrinsischen Konnektivität des dorsolateralen Präfrontalkortex sowie der posterior-parietalen, ventralen, okzipito-temporalen und anterior-temporalen Regionen eine Verbindung zum zukünftigen arithmetischen Zugewinn im Alter von 8 Jahren auf (Evans et al., 2015). Auch bezüglich der strukturellen Konnektivität konnten Zusammenhänge gefunden werden. Dabei zeigte sich eine signifikante Beziehung zwischen der linksseitigen temporo-parietalen WM (superiore Corona radiata) und Rechenleistungen sowohl bei Kindern (van Eimeren, Niogi, McCandliss, Holloway & Ansari, 2008) wie auch Adoleszenten (Matejko, Price, Mazzocco & Ansari, 2013). Zudem wurde ein Zusammenhang zwischen der Rechenleistung und dem superioren Fasciculus longitudinalis, welcher den posterioren parietalen Kortex mit dem Präfrontalkortex verbindet, sowie dem inferioren

Fasciculus longitudinalis, welcher den Präfrontalkortex mit ventralen okzipito-temporalen Arealen verbindet, berichtet (Li et al., 2013). Dabei resultierten Unterschiede von Beziehungen je nach Rechenart: positive Korrelationen wurden zwischen dem Fasciculus arcuatus und Additions- sowie Multiplikations-, nicht aber Subtraktions- und Divisionsaufgaben beobachtet, was auf die Beteiligung des Fasciculus arcuatus beim Faktenabruf hinweist (Van Beek, Ghesquière, Lagae & De Smedt, 2014).

Methode

Untersuchungen des Gehirns profitierten in den letzten Jahrzehnten von den Fortschritten der bildgebenden Verfahren, welche anatomische Strukturen möglichst präzise visualisieren. Da im zweiten Teil der Masterarbeit eine MRT-Studie vorgestellt wird, soll zum besseren Verständnis eine Einführung in die MRT-Methode vorgenommen werden. Einerseits wird die MRT im Allgemeinen vorgestellt, andererseits wird auf die Grundlagen der strukturellen MRT eingegangen. Aufgrund der Thematik werden die Inhalte auf das Gehirn bezogen und entstammen den Büchern von Jäncke (2005) sowie Jäncke (2017).

Die Magnetresonanztomographie. Bei der Bildgebung des Gehirns werden verschiedene Messansätze unterschieden. Dazu gehören die strukturelle MRT, welche Hirnstrukturen sichtbar macht und anatomische Analysen ermöglicht, und die funktionelle MRT, welche neurophysiologische Veränderungen bestimmter Hirnregionen misst. Der Kernspin ist das physikalische Prinzip, welches beiden Messansätzen zugrunde liegt.

Kernspin. Der Kernspin des Wasserstoffatoms (^1H) ist eine Grundeigenschaft von Elementarteilchen und kann als Eigendrehung des Protons beschrieben werden. Dabei dreht sich das Proton um seine eigene Achse wie ein Kreisel. Weil es über eine rotierende Ladung verfügt, besitzt es ein magnetisches Moment (B) und verhält sich wie ein Stabmagnet. Dadurch wird das Proton von Magnetfeldern und elektromagnetischen Wellen beeinflusst. Wird ein Magnetfeld (B_0) von aussen angelegt (Abbildung 4), richten sich die Spins wie Kompassnadeln entlang des Feldes parallel oder antiparallel aus und eine Längsmagnetisierung (M_z) in der Z-Ebene baut sich auf. Es entstehen Kreiselbewegungen der Spins, die mit einer charakteristischen Frequenz (Larmorfrequenz) erfolgen, welche sich proportional zur Magnetfeldstärke des äusseren Magnetfeldes zeigen und fundamental für die MRT-Bildgebung sind. Nachdem die Spins entlang der Magnetfeldlinie ausgerichtet wurden, befinden sie sich in einem relativ stabilen Zustand (Abbildung 5). Wird nun anhand einer elektromagnetischen Welle mit hoher Frequenz Energie zugefügt, kann das stabile System gestört werden und die Spins werden aus der Z-Richtung gekippt. Dabei kann die Kipp-Art

durch die Wahl bestimmter Hochfrequenzimpulse präzise beeinflusst werden.

Hochfrequenzimpulse, welche eine Auslenkung der Längsmagnetisierung um genau 90° erreichen, führen dazu, dass alle Spins und deren Magnetisierung M_z in die XY-Ebene umklappen, so dass eine Transversalmagnetisierung entsteht. Die Spins versuchen aufgrund des äusseren Magnetfeldes erneut, in die Z-Richtung zurückzukehren, wobei die Bewegung des Protons ein messbares Signal bildet. Dies stellt das eigentliche gemessene MR-Signal dar.

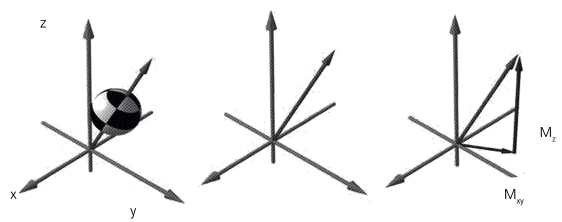


Abbildung 4. Das Magnetfeld im MRT. Das Magnetfeld kann anhand von drei Dimensionen (Ebene X, Y und Z) beschrieben werden. M_z stellt dabei die Längsmagnetisierung, M_{xy} die Transversalmagnetisierung dar (Jäncke, 2005, S. 26).

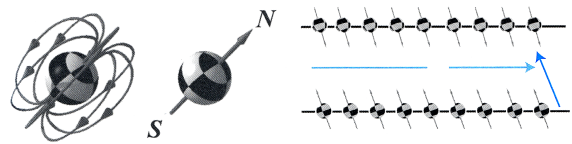


Abbildung 5. Ausrichtung im Magnetfeld. Auf der linken Seite ist eine schematische Darstellung eines Protons ersichtlich, das infolge seines Spins ein magnetisches Feld mit einem Nord- (N) und Südpol (S) aufbaut. Auf der rechten Seite sind die Protonen in einem Magnetfeld parallel oder antiparallel ausgerichtet zu sehen (Jäncke 2017, S.115).

Relaxation und Bildkontraste. Mit der Zeit schwächt sich die transversale Magnetisierung ab, und durch das Streben der Spins, wieder in ihren stabilen Ausgangspunkt zurückzukehren, entwickelt sich erneut eine Längsmagnetisierung. Dies wird als Rückbildungsprozess bezeichnet. Dabei wird die aufgenommene Energie wieder an die Umwelt abgegeben. Zwei beteiligte Prozesse werden dabei beschrieben: die T1-Relaxation (Längsrelaxation) und die T2-Relaxation (transversale Relaxation). Die Relaxationszeiten sind für anatomische Messungen sehr wichtig. Die T1-Relaxation entspricht dem Zeitpunkt, an dem 63 % der Protonen in Längsrichtung relaxiert sind respektive die Längsmagnetisierung auf 63 % der Originalstärke zurückgekehrt ist. Folglich haben sich die Spins nach 3 bis 5 T1-Zeiten erholt und wieder die optimale Längsmagnetisierung erreicht. T1-Relaxationen werden mit zunehmender Magnetfeldstärke schneller, während die T1-Zeiten länger werden. Dabei ist die T1-Relaxation mit der Abnahme der T2-Relaxation verbunden. Die T2-Relaxation kommt jener Zeit gleich, nach der 63 % der Protonen in

Querrichtung relaxiert sind respektive die Transversalmagnetisierung auf 37 % der Ausgangsgrösse abgesunken ist. Folglich ist nach 4 bis 5 T2-Zeiten keine Transversalmagnetisierung mehr vorhanden. Da die Spins Energie untereinander austauschen und nicht an die Umgebung abgeben, wird mit der Zeit das MR-Signal kleiner und verschwindet schliesslich ganz. Weil die T2-Relaxation jedoch wesentlich schneller abläuft, zerfällt das MR-Signal durch die T2-Relaxation bereits in den ersten 100 bis 300 ms, deutlich bevor sich die Längsrelaxation anhand der T1-Relaxation wieder voll aufgebaut hat (0,5 bis 5 Sekunden). Je nach Gewebetyp können typische T1- und T2-Relaxationszeiten unterschieden werden, wobei sich die Transversal- und Längsmagnetisierung je nach Gewebe unterschiedlich schnell zurückbilden (Abbildung 6). Mit diesen typischen Relaxationszeiten kann nun der Gewebetyp bestimmt werden. Dabei wird auf drei Parameter zurückgegriffen, welche die Stärke des gemessenen Signals respektive die Helligkeit im MR-Bild bestimmen: die Protonendichte (Anzahl anregbare Spins pro Volumeneinheit), die T1- (Erholungszeit der Spins) sowie die T2-Zeit (Abnahme des MR-Signals nach Anregung des Gewebes). Protonendichte, T1- und T2-Zeit sind also spezifische Merkmale, aufgrund derer sich Gewebearten deutlich unterscheiden lassen.

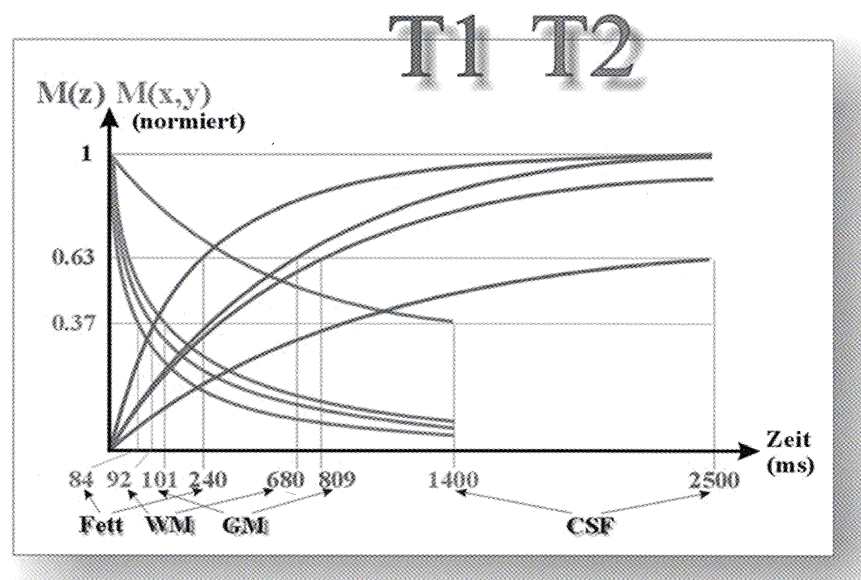


Abbildung 6. Darstellung der T1- und T2-Relaxationszeiten je Gewebeart. Unterschieden werden die Relaxationszeiten für die GM, WM und CSF (Jäncke, 2005, S. 33).

Räumliche Informationen. Bei der MRT-Messung des Gehirns wird dieses in einzelne Schichten zerlegt. Die Schichtdicke kann je nach Fragestellung ausgewählt und nacheinander mehrere Male angeregt werden. Die Repetitionszeit (TR) entspricht dabei der Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Anregungen und beeinflusst den T1-Kontrast. Die Echozeit (TE) gibt weiter an, wie viel Zeit von der Anregung bis zur Messung des MR-Signals vergangen ist und steht in Verbindung zum T2-Kontrast. Grundlage für die Berechnung von Bildinformationen ist das FID-Signal (free induction decay), das dem MR-Signal entspricht. Es repräsentiert die Summe der Resonanzen aller Teile des angeregten Gewebes und erlaubt, sämtliche Bildinformationen zu rekonstruieren. Indem nun einzelne Schichten gezielt angeregt werden, erhält man für jede Schicht entsprechende MR-Signale (selektive Schichtanregung). Zudem müssen einzelne Orte innerhalb einer Schicht präzise definiert werden (Ortskodierung). Um nun räumliche Informationen aus einem Signal gewinnen zu können, wird das homogene Magnetfeld mit einem magnetischen Feldgradienten überlagert. Drei Magnetspulen entsprechend der Koordinatenachsen (x-, y- und z-Gradientenspulen) bilden diesen Feldgradienten und ermöglichen, selektiv für jeden Ort des Körpers unterschiedliche Magnetfeldstärken bilden zu können. Dabei erzeugt die z-Gradientenspule einen Gradienten entlang der Körperachse, die x-Gradientenspule in der horizontalen Ebene (meist von links nach rechts) und die y-Gradientenspule von unten nach oben. Die in der z-Ebene liegenden transversalen Schichten liegen in unterschiedlichen Magnetfeldern mit unterschiedlichen Magnetfeldstärken, weshalb jede Schicht durch eine eigene bestimmte Larmorfrequenz angeregt werden kann (Schichtselektion). Jede Schicht kann dabei als eine Scheibe betrachtet werden, die aus Spalten und Reihen von Würfeln (Voxeln) besteht und eine Matrix bildet. Im MR-Bild entspricht jedes Voxel einem Bildpunkt mit einem bestimmten Grauwert, der zur Bildkonstruktion notwendig ist (Abbildung 7). Die Spalteninformation wird anhand der Frequenzkodierung in der x-Ebene errechnet, wobei jede Spalte einen Amplitudenwert erhält. Die Zeileninformation wird anhand der Phasenkodierung in der y-Ebene bestimmt, wobei jede Zeile durch eine künstlich hervorgerufene Verschiebung der Phase kodiert wird. Anhand einer Fourier-Transformation können einzelne Frequenzen und Phasenlagen ermittelt und in ein zweidimensionales Bild umgerechnet werden (Abbildung 8). Die Ortskodierung hilft also, die Signale den einzelnen Voxeln zuordnen zu können.

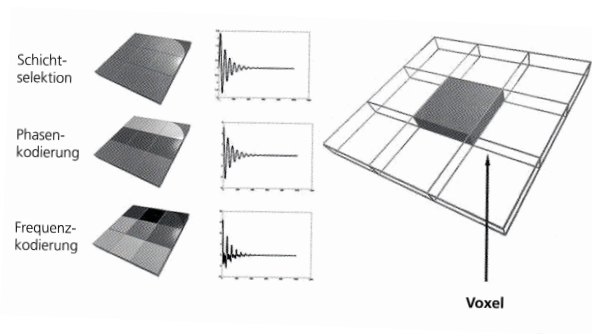


Abbildung 7. Räumliche Information. Die ausgewählte Schicht kann als Matrix gesehen werden, die aus Spalten und Reihen von Würfeln (Voxeln) zusammengesetzt ist. Auf der Basis des MR-Signals können die einzelnen Informationen für jedes Voxel berechnet werden (Jäncke, 2005, S. 40).

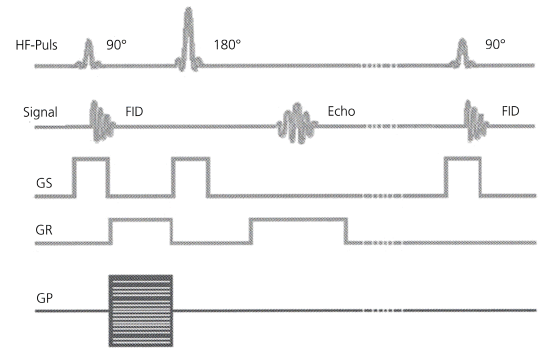


Abbildung 8. Darstellung der Ortskodierung des Signals anhand von Gradienten. Dabei stellt HF-Puls einen Hochfrequenzimpuls, FID den free induction decay, GS den Schichtselektionsgradienten (z-Ebene), GR den Frequenzkodiergradienten (x-Ebene) und GP den Phasenkodiergradienten (y-Ebene) dar (Jäncke, 2005, S. 41).

Grundlagen der strukturellen Magnetresonanztomographie. Die strukturelle MRT misst hirnanatomische Strukturen anhand einer guten räumlichen Auflösung und erlaubt weitere Analysemethoden.

Morphometrische Verarbeitung. Bei der klassischen In-vivo-Morphometrie werden anatomische Regionen aufgrund von anatomischen Landmarken vermessen und eine dreidimensionale Rekonstruktion des Gehirns vorgenommen. Gehirnvolumina können heutzutage anhand entsprechender Programme wie zum Beispiel dem Statistical Parametric Mapping (SPM) ziemlich einfach vermessen werden. Mithilfe von probabilistischen Segmentierungsmethoden werden GM und WM von Zerebrospinalflüssigkeit (CSF) und Schädelkalotte gut getrennt. Für jedes Voxel wird in der Folge die Wahrscheinlichkeit bestimmt, mit der es einer Substanz zugeordnet werden kann.

Stereotaktische Normalisierung. Damit Gehirne interindividuell vergleichbar werden und um die Identifikation von Hirnstrukturen zu vereinfachen, werden sogenannte Atlssysteme verwendet. Das erste dieser Systeme haben die Hirnchirurgen Talairach und Tournoux (1988) entwickelt. Bei der stereotaktischen Normalisierung werden die Gehirnbilder in einen Standardraum transformiert, damit sie dort anhand eines standardisierten Koordinatensystems analysiert werden können. Als Grundlage dienen anatomische Landmarken. Die primären Landmarken sind die anteriore und posteriore Kommissur, wobei deren Verbindungslinie zur Ausrichtung des Koordinatenraumes

verwendet wird. Zuerst werden die Gehirnbilder entlang der drei Achsen (x-Achse = rechts / links; y-Achse = anterior / posterior; z-Achse = inferior / superior) verschoben und danach rotiert. Weil das Bild dabei seine Form und Grösse behält, wird von der rigiden Transformation gesprochen. Danach findet die Reskalierung der drei Achsen statt, bis Länge, Höhe und Breite des zu skalierenden Gehirns dem Standardgehirn entsprechen. Weiter kann eine Scherung vorgenommen werden. Diese Transformationen (Verschiebung, Rotierung, Skalierung und Scherung) werden als affine (lineare) Normalisierung bezeichnet und passen auch lokale Unterschiede zwischen den Gehirnen an, bis sie in den Standardraum passen (Abbildung 9).

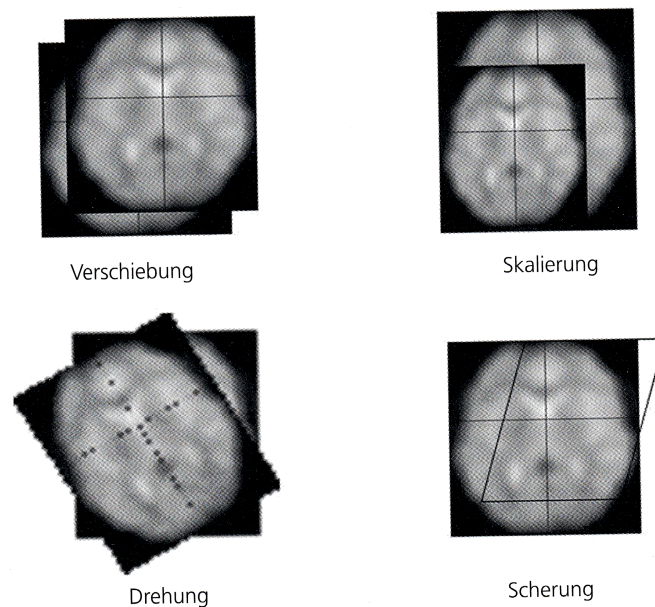


Abbildung 9. Normalisierung. Zu sehen sind jene Operationen, die bei der stereotaktischen Normalisierung durchgeführt werden (Jäncke, 2005, S. 68). Dazu gehören Verschiebung, Drehung, Skalierung und Scherung.

Die Hirnbilder können auch nach Vorgaben des Montreal Neurological Institute (MNI) in den Standardraum normalisiert werden (Collins, Neelin, Peters, & Evans, 1994). Das MNI-Gehirn wurde aus einer Vielzahl repräsentativer Gehirne gebildet und steht als sogenanntes Mittelwertsgehirn (Normgehirn) als Template zur Verfügung. Im Laufe der Zeit wurden weitere Normalisierungsverfahren entwickelt, welche eine exakte Anpassung eines jeden Gehirns an ein beliebiges anderes Gehirn ermöglichen. Dabei werden gyrale und sulcale Strukturen dem Normgehirn optimal angeglichen (Toga & Thompson, 1999).

Voxel- und oberflächenbasierte Morphometrie. Die klassische Morphometrie wird angewendet, um anatomische Areale zu segmentieren und volumetrisieren. Kurz soll der Ablauf der Analyse der voxelbasierten Morphometrie (VBM) beschrieben werden, der in Abbildung 10 bildlich dargestellt ist. Die Gehirne werden zu Beginn linear normalisiert und danach in GM, WM sowie in CSF segmentiert. Danach wird die räumliche Glättung (Smoothing) vorgenommen. Dabei können Gauss'sche Filter verwendet werden, welche die Nachbarvoxel mit abnehmender Gewichtung in die Mittelung miteinbeziehen. Die Daten können dann der statistischen Analyse zugeführt und Gruppenunterschiede anhand von t-Tests je Voxel berechnet werden. Weil jedoch unzählige Voxel in solche Berechnungen einfließen, muss zur Verhinderung eines kumulierenden Alpha-Fehlers eine Korrektur anhand des Signifikanzniveaus entsprechend der Anzahl abhängiger Voxel vorgenommen werden. Kennwerte, die bei der VBM berechnet werden können, sind das Volumen der GM und WM.

Der Ablauf der Analyse der oberflächenbasierten Morphometrie (SBM) ist in vielen Schritten ähnlich wie die VBM. Zusätzlich zu den Schritten der VBM können Berechnungen der Oberfläche beider Gehirnhemisphären vorgenommen werden. Mit der SBM lassen sich Kennwerte wie die kortikale Dicke, die kortikale Oberflächenkomplexität (fraktaler Dimensionsindex), der Gyrfikationsindex (mittlere Gyrfikation) sowie die sulcale Tiefe berechnen. Zudem werden während des Ablaufs der kortikalen Oberflächenberechnungen Korrekturen für die räumliche Struktur ausgeführt sowie werden die Daten sphärisch erfasst, was eine genaue Messung erlaubt. Die SBM-Methode verfügt über einige Vorteile: Die Gehirnoberflächengewebe zeigen eine genauere Normalisierung (Desai, Liebenthal, Possing, Waldron & Binder, 2005), zusätzliche Analysearten (zum Beispiel Gyrfikationsindex) sind möglich und ausserdem können anhand der sphärischen Kartierung auch die vergrabenen Sulci sicht- und messbar gemacht werden (Gaser & Dahnke, 2016).

Probability-Atlanten. Als problematisch bei solchen bildgebenden Verfahren zeigten sich die vorhandene Variabilität hinsichtlich der Lokalisation und Ausdehnung anatomischer Landmarken zwischen Personen sowie mögliche fehlende Korrelationen dieser Landmarken mit den Grenzen zytoarchitektonischer Areale. Hierfür werden sogenannte Probability-Atlanten (Wahrscheinlichkeitskarten) eingesetzt, welche bestimmen, mit welcher Wahrscheinlichkeit an einem Koordinatenpunkt eine bestimmte anatomische Landmarke lokalisiert ist. In den letzten Jahren wurden mehrere Wahrscheinlichkeitskarten für spezifische Areale erstellt. Sind die Gehirne stereotaktisch normalisiert, können Areale

dreidimensional überlagert und je Voxel die Wahrscheinlichkeit für ein bestimmtes zytoarchitektonisches Areal bestimmt werden. Damit wird es möglich, anatomische Hirnstrukturen zu identifizieren, ohne sich einzig auf anatomische Landkarten verlassen zu müssen.

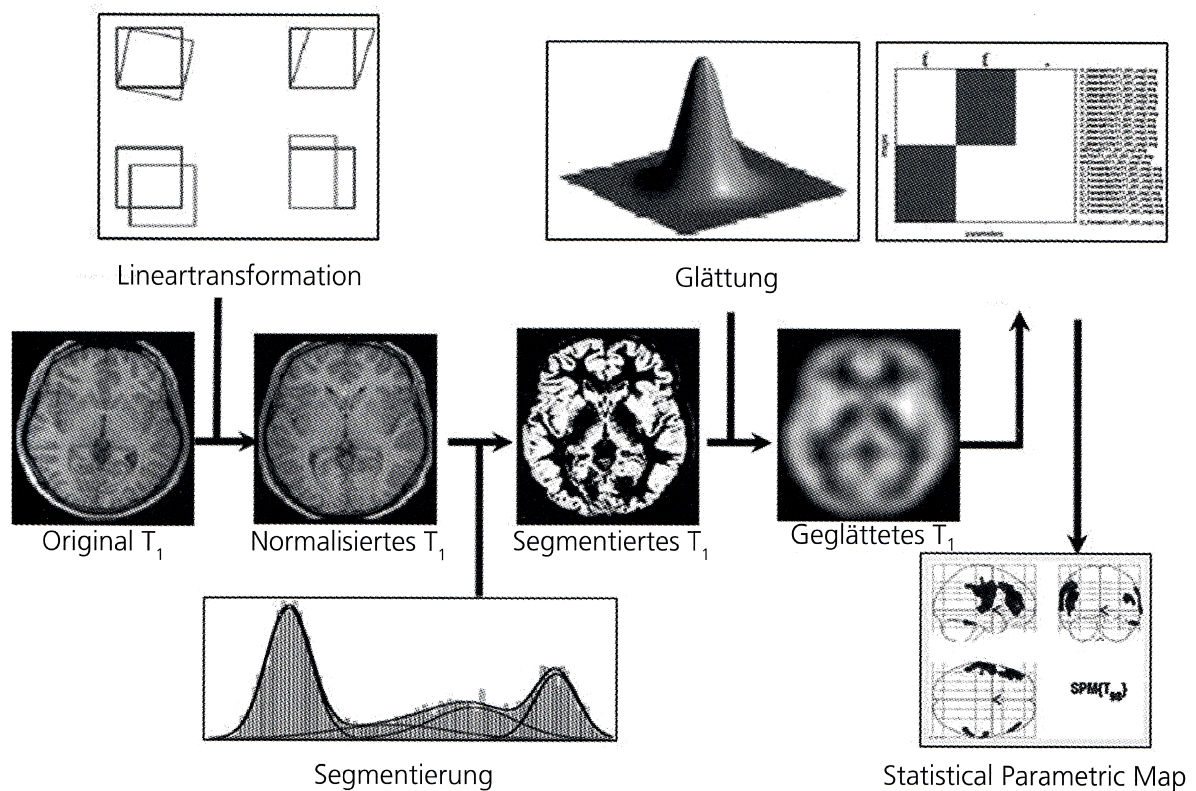


Abbildung 10. Schematische Darstellung des Ablaufs der VBM. Zu sehen sind die einzelnen Schritte, die in der VBM-Analyse durchgeführt werden (Jäncke 2005, S. 71).

Verhaltensstudie

Theoretischer Hintergrund

Im ersten Teil der Masterarbeit wurde eine Verhaltensstudie mit Daten von Kindern und Jugendlichen mit und ohne Dyskalkulie durchgeführt, welche im Zentrum für MR-Forschung des Kinderspital Zürichs untersucht wurden. Analysiert wurde dabei das Lösungsverhalten im BASIS-MATH 4-8 (BM 4-8, Moser Opitz et al., 2010), einem Rechentest, der aufzeigen soll, ob eine Person über die grundlegenden Rechenfertigkeiten verfügt, und der im Rahmen der Dyskalkulie-Diagnostik eingesetzt werden kann. Dabei muss beachtet werden, dass die Diagnostik bei Kindern und Jugendlichen nicht direkt von der Diagnostik Erwachsener abgeleitet werden kann. Folgend soll deshalb der Blick auf die Diagnostik bei Kindern und Jugendlichen gelegt werden, welche mit Besonderheiten einhergeht sowie mögliche Probleme bei der Diagnosestellung hervorruft. Danach wird die Diagnostik spezifisch in Hinblick auf die Dyskalkulie beschrieben. Die Inhalte zur Beschreibung der Diagnostik entstammen, wenn nicht anders vermerkt, den Buchkapiteln *Neuropsychologische Testverfahren für Kinder und Jugendliche* (Drechsler & Günther, 2018) sowie *Zahlenverarbeitung und Rechnen* (Krinzinger & Günther, 2019). Auf die Richtlinien der ICD-10 und der DSM-5 wurde bei der Beschreibung der Definition bereits teilweise eingegangen. Die Diagnosekriterien sollen in diesem Teil anhand der bereits erwähnten S3-Leitlinien genauer beschrieben werden.

Diagnostik bei Kindern und Jugendlichen. Die Vielfalt der Bereiche und Aspekte, welche in der Diagnostik mit Kindern und Jugendlichen allgemein berücksichtigt werden müssen, erweist sich als gross. So müssen Neuropsychologen die Gesamtentwicklung betrachten, um neuropsychologische Störungen einordnen zu können, und Wissen hinsichtlich verschiedenster Nachbardisziplinen mitbringen. Im Vergleich zu Erwachsenen können neuropsychologische Störungen immer nur vor dem Hintergrund von Modellen der normalen Entwicklung beurteilt werden (Baron, 2004). Nebst Kenntnissen bezüglich der typischen Entwicklung ist auch Wissen über klinische und neuropsychologische Störungsbilder des Kindes- und Jugendalters, Besonderheiten der Gehirnentwicklung bei vorhandenen Störungen, entsprechende Untersuchungsverfahren sowie praktische Aspekte im Umgang mit Kindern bei der Testung erforderlich. Des Weiteren müssen immer das erweiterte Umfeld des Kindes (Eltern, Schule, Ärzte etc.) sowie die häufigen Begleitstörungen (zum Beispiel psychische Störungen oder Verhaltensauffälligkeiten) betrachtet werden. Aufgrund dieser Interaktionen mit Umwelt- und anderen Faktoren sollte

das Kind in seiner Ganzheit untersucht und verstanden werden. Die Neuropsychologie bei Kindern und Jugendlichen stellt aufgrund dieser Komplexität und den vielen Eigenheiten eine eigenständige Unterdisziplin der Neuropsychologie dar.

Das neuropsychologische Vorgehen kann als hypothesengeleitetes Testen oder als neuropsychologisches Screening durchgeführt werden. Das Screening erfolgt ohne spezifische Störungshypothese und gibt einen Gesamtüberblick über das entsprechende neuropsychologische Leistungsprofil. Das hypothesengeleitete Testen orientiert sich an einer spezifischen Fragestellung zu einem individuellen Fall und lässt Schlussfolgerungen zu.

Das sich entwickelnde Gehirn. Die Entwicklungsneuropsychologie beschreibt, dass sich Störungen eines sich noch entwickelnden Gehirns anders auswirken können als bei Erwachsenen (zum Beispiel Kaufmann, Proksch & Mrakotsky, 2011). Die neuropsychologische Untersuchung stellt folglich nur eine kurze Momentaufnahme innerhalb des Entwicklungsverlaufes dar. Denn das Gehirn befindet sich, ganz unabhängig von möglichen störungsbedingten Erholungs-, Reorganisations- oder Kompensationsprozessen, ständig in Veränderung. Zur Beurteilung der Untersuchungsbefunde und Einschätzung einer Prognose muss ein Vergleich mit einer Altersnorm erfolgen und es sollten die Ätiologie der Störung, das Alter bei Störungsbeginn sowie zum Untersuchungszeitpunkt, die Art der Störung (domänenspezifisch oder domänenübergreifend), die vermutete kognitive Reserve, das prämorbid Funktionsniveau, Umgebungsfaktoren (soziales Umfeld, familiäre Bedingungen und Fördermöglichkeiten) und weitere Störungsbilder miteinbezogen werden. Dabei muss beachtet werden, dass sich frühe Schädigungen auf das Entwicklungspotenzial auswirken und Schädigungen möglicherweise erst Jahre später ersichtlich werden.

Auch in Bezug auf die Neuroanatomie und auf Neurofunktionen sind Unterschiede zwischen Kindern und Erwachsenen auszumachen. Während der Hirnentwicklung ereignen sich aufeinanderfolgende Reifungsphasen von Zellwachstum, Dendritenaussprossung, programmiertem Abbau der GM und anschließender Zunahme von WM (Houston, Herting & Sowell, 2013). Diese Reifungsprozesse ereignen sich je nach Hirnareal zeitlich versetzt und in unterschiedlichen Entwicklungsstadien. Auch neuropsychologische Funktionen zeigen parallel dazu versetzte Entwicklungsverläufe. Dabei variiert das neuroanatomische Substrat der entsprechenden neuronalen Schaltkreise, die für die Bewältigung von Aufgaben rekrutiert werden, in verschiedenen Entwicklungsaltern und je nach Störung. Eine maximale Effizienz und Spezialisierung von Gehirnfunktionen und neuronalen Substraten wird oftmals erst im Erwachsenenalter erreicht.

Frühe und tiefgreifende Störungen der Hirnentwicklung lassen sich oftmals auf genetische Faktoren oder prä- respektive perinatale Schädigungen zurückführen. Dabei werden je nach Zeitpunkt und Mechanismus der Schädigung andere Hirnstrukturen beeinträchtigt und folglich weitere Entwicklungsprozesse verändert oder erschwert. Im Vergleich zu erworbenen Hirnschädigungen werden bei den frühen Störungen die neuropsychologischen Auswirkungen erst lange nach dem Zeitpunkt der Schädigung ersichtlich, wenn die entsprechenden Fähigkeiten nicht oder verzögert ausgebildet werden. Zudem können verschiedene Störungen zu einem ähnlichen phänotypischen Verhalten führen und zugleich innerhalb der Störungsbilder eine grosse neuropsychologische Heterogenität aufweisen (zum Beispiel AD(H)S und Autismus-Spektrum-Störungen).

Entwicklungsverläufe. Die aktuelle Forschung geht davon aus, dass die Folgen der kognitiven Entwicklung umso ungünstiger ausfallen, je früher die Schädigung auftritt, je unreifer das Gehirn ist und je weniger Funktionen bereits ausdifferenziert sind. Abbildung 11 zeigt, wie unterschiedlich und komplex mögliche Entwicklungsverläufe im Vergleich zu Erwachsenen sein können. Während bei Erwachsenen angestrebt wird, nach einem Leistungseinbruch das Ausgangsniveau wieder zu erreichen (Bild A), können bei Kindern verschiedene Verläufe beobachtet werden: ein Entwicklungsstillstand (Bild B), eine Angleichung an das entwicklungstypische Fähigkeitsniveau (Bild C), ein growing into deficit, beim dem sich die Schwierigkeiten erst viel später zeigen (Bild D), ein komplett aufgeholt Entwicklungsstand (Bild E), Entwicklungsfortschritte mit jedoch stabilem Leistungsabstand zur Norm (Bild F), Entwicklungsfortschritte mit zunehmendem Abstand zur typischen Entwicklung (Bild G) und eine von Beginn an abweichende Entwicklung (Bild H). Der Entwicklungsverlauf bei der Dyskalkulie entspricht generell dem in Bild F dargestellten Entwicklungsverlauf, was bedeutet, dass Menschen mit einer Rechenstörung durchaus Fortschritte bezüglich ihrer mathematischen Fähigkeiten erzielen, ihre Leistung aber konstant schlechter ausfällt, im Vergleich zur Norm.

Diese Beispiele zeigen, dass die Plastizitätsprozesse des sich entwickelnden Gehirns nicht linear, sondern komplex verlaufen. Zudem sollten sogenannte kritische Phasen beachtet werden, bei denen Fähigkeiten und Funktionen in der Auseinandersetzung mit Umwelteinflüssen ausgebildet werden. Werden diese Auseinandersetzungen gestört, lassen sich entsprechende Entwicklungsstadien nicht mehr komplett aufholen.

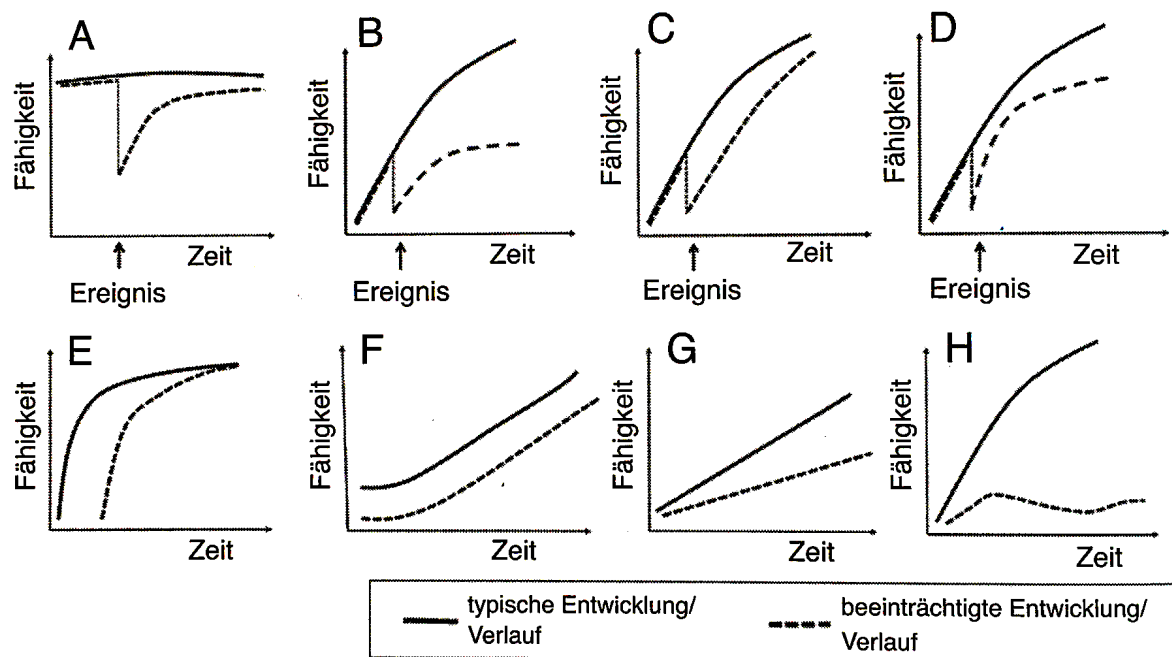


Abbildung 11. Darstellung verschiedener möglicher Verläufe nach einer Hirnschädigung (Drechsler & Günther, 2018, S. 32).

A: Verlauf Erwachsene: Leistungsabfall nach Hirnschädigung, danach Verlauf mit Annäherung an prä-morbides Niveau.

B bis H: Verläufe beim Kind. B bis D bei erworbener Hirnschädigung. E bis H Entwicklungsstörungen aufgrund genetischer oder prä- respektive perinataler Ereignisse.

B: Erworbene Hirnschädigung, Leistungsabfall und danach Stabilisierung auf erreichtem Entwicklungsniveau (Entwicklungsstillstand).

C: Erworbene Hirnschädigung, Leistungseinbruch, fortgesetzte Entwicklungsfortschritte mit Annäherung an typische Entwicklung.

D: Erworbene Hirnschädigung, erst teilweise Erholung, langfristig jedoch zunehmender Abstand zur typischen Entwicklung (growing into deficit).

E: Aufgeholte Entwicklungsverzögerung.

F: Entwicklungsverzögerung mit im Verlauf stabilem Rückstand.

G: Entwicklungsverzögerung mit zunehmendem Abstand zum alterstypischen Fähigkeitsniveau.

H: Tiefgreifende Entwicklungsabweichung.

Methodische Besonderheiten und mögliche Probleme der Diagnosestellung.

Aufgrund der beschriebenen Komplexität der Diagnostik bei Kindern und Jugendlichen ergeben sich einige methodische Besonderheiten, die beachtet werden sollten. Dazu gehört, dass Testverfahren in unterschiedlichen Entwicklungsaltern unterschiedliche Konstrukte messen. Deshalb sollten altersangepasste Tests durchgeführt werden. Wird der Schwierigkeitsgrad nicht an die Altersvoraussetzung angepasst, können Decken- und Bodeneffekte entstehen und die Diskriminierung im oberen respektive unteren Altersbereich nimmt ab. Weiter muss beachtet werden, dass Testergebnisse durch verschiedene

Mechanismen (zum Beispiel durch Kompensation) beeinflusst werden können. Zum Beispiel kann ein Mensch mit einem Asperger-Syndrom emotionale Gesichtsausdrücke anhand von Merkmalsanalysen und Erfahrung verarbeiten und nicht aufgrund der Wahrnehmung der entsprechenden neurobiologischen Signalfunktion. Es erscheint deshalb sinnvoll, auch scheinbar unbeeinträchtigte Funktionsbereiche bezüglich spezifischer Teilleistungsprofile zu untersuchen. Zudem muss die Interpretation von Verläufen vorsichtig vorgenommen und zwischen Regression und Stagnation unterschieden werden. Verharren nämlich Leistungen über die Zeit auf demselben Niveau, erscheinen diese in alterskorrigierten Normwerten als tendenzielle Verschlechterung, obwohl die Rohwerte gleich geblieben sind oder sogar eine leichte Verbesserung aufweisen. Auch Testwiederholungseffekte müssen hinsichtlich möglicher Entwicklungseffekte und Lerneffekte beachtet werden.

Diagnostik der Dyskalkulie. Wie zuvor erläutert, umfasst das Symptombild der Dyskalkulie viele unterschiedliche Kompetenzen und gestaltet sich je nach Person individuell. Die Erkennung der Störung wird dadurch erschwert, dass mathematische Fertigkeiten aus mehreren Teilfertigkeiten bestehen, die auch unabhängig voneinander gestört oder mangelhaft ausgeprägt sein können. So ist es sinnvoll, möglichst viele Teilbereiche der Zahlenverarbeitung und des Rechnens einzeln zu überprüfen. Für die Diagnosestellung notwendige Inhalte sind einstellige Additionen, Subtraktionen und ab der zweiten Klasse auch Multiplikationen. Sinnvollerweise wird eine Zeitmessung oder die Beurteilung der Rechenstrategien vorgenommen, um weitere Informationen über die vorhandenen Schwierigkeiten zu erhalten. Ab der zweiten respektive dritten Klasse sind weiter mehrstellige Additionen und Subtraktionen respektive schriftliche Rechenaufgaben erforderlich und sollten Hinweise bezüglich der Beherrschung des Zehnerüberganges sowie von Rechenprozeduren geben. Ebenso sollten Textaufgaben und das konzeptionelle Verständnis der Grundrechenarten überprüft werden. Zudem können Aufgaben zu Grössenvorstellungen von Zahlen, Zählfertigkeiten oder Subtizing wichtige Informationen liefern. Die Überprüfung der mathematischen Kompetenzen ist für den diagnostischen Prozess zwar wichtig, aber alleine nicht ausreichend. Im nächsten Abschnitt wird anhand der S3-Leitlinien auf weitere Faktoren eingegangen, die bei einem diagnostischen Prozess berücksichtigt werden müssen. Um Betroffene möglichst früh identifizieren und an die Diagnostik passende Fördermöglichkeiten anknüpfen sowie individuelle Empfehlungen aussprechen zu können, muss diese äusserst differenziert vorgenommen werden und Auskunft über spezifische Schwierigkeiten, aber auch vorhandene Kompetenzen bieten.

Schipper und Wartha (2017) schlagen deshalb eine prozessorientierte Diagnostik vor, die eine Beobachtung während des Lösungsprozesses ermöglicht. So können eine lange Bearbeitungszeit oder zählendes Rechnen wichtige Hinweise auf die Art von Problemen beim Lösen von Rechenaufgaben darstellen. Die Testauswahl zur Diagnosestellung der Rechenstörung ist wesentlich, wobei gerade bei der Dyskalkulie nur eine beschränkte Anzahl Tests zur Verfügung steht. Einerseits werden curricular basierte Tests eingesetzt, welche abhängig von der Klassenstufe den Erwerb des bisherigen Schulstoffes überprüfen, und andererseits neuropsychologisch fundierte Tests, die spezifische Aspekte der Zahlenverarbeitung und des Rechnens untersuchen. Dabei muss beachtet werden, dass curriculare Tests für die weiterführende Schule nicht mehr eingesetzt werden können.

S3-Leitlinien. Laut den S3-Leitlinien sollen psychometrische Tests durchgeführt werden, welche standardisiert und multidimensional sind und die Mathematikleistung erfassen. Zusätzlich sollen aber auch die Leistungen des visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnisses, der Exekutivfunktionen sowie der allgemeinen kognitiven Fertigkeiten untersucht werden, da sie wesentliche Bestandteile der Mathematikleistung darstellen. Neben den testmetrischen Untersuchungen sollen anhand einer differenzierten Anamnese der biografische Entwicklungsverlauf, die Familien- und Schulsituation, die schulische Integration, die gesellschaftliche Teilhabe sowie die Auswirkung der Leistungsdefizite auf die psychische und soziale Entwicklung erfragt und eine klinische Untersuchung durchgeführt werden. Zur Beurteilung der Testleistung sollte die Alters- oder Klassennormdiskrepanz beachtet werden. Weist diese mindestens 1,5 Standardabweichungen auf, spricht dies für das Vorliegen einer Rechenstörung. Stützen zudem klinische und qualitative Kriterien den Verdacht einer Dyskalkulie deutlich, kann ein weicheres Diagnosekriterium von mindestens 1 Standardabweichung angewendet werden, womit mögliche angewendete Kompensationsmassnahmen berücksichtigt werden. Da die Mathematikleistung bis zum Beginn der zweiten Klasse noch schwankt, werden vom Kindergarten bis Anfang der ersten Klasse Verfahren zur Risikoidentifikation angewendet und keine Diagnosen ausgesprochen. Die S3-Leitlinien schlagen verschiedene Verfahren unterschiedlicher Qualität vor, wobei die Testauswahl auch von den Schwierigkeiten des Kindes, den Zielen des Diagnostikers sowie der Diagnosesituation abhängen. Damit eine Dyskalkulie-Diagnose gestellt werden darf, müssen Hirnschädigungen oder -krankheiten sowie Hör- und Sehprobleme ausgeschlossen werden. Zudem darf keine Intelligenzminderung ($IQ < 70$) vorliegen. Ebenso berücksichtigt werden müssen eine

unangemessene Beschulung und weitere Störungen wie die LRS oder AD(H)S.

Weil Rechenstörungen bekanntlich eine hohe Persistenz aufweisen, umfassen Diagnostik und Behandlung die gesamte Lebensspanne. Die diagnostischen Prozesse und Förderinhalte sind bei älteren Jugendlichen und Erwachsenen deshalb gleich anzuwenden, wenn auch auf die Auswahl der Diagnoseverfahren geachtet werden muss.

Kinderspital Zürich. Für den diagnostischen Prozess am Kinderspital Zürich wird in erster Linie zwischen Schulbereich und Nachschulbereich unterschieden. Der Schulbereich umfasst die Primarstufen sowie die Sekundarstufe 1, während der Nachschulbereich aus der Sekundarstufe 2 sowie den nachfolgenden höheren Ausbildungsstufen besteht. Während eines ersten Termins wird in einem Vorgespräch eine differenzierte Anamnese erhoben. Abhängig vom gewonnenen Bild, wird die Planung der Untersuchung vorgenommen. Während eines zweiten Termins werden testmetrische Abklärungen je Fragestellung durchgeführt. Dabei werden nebst rechnerischen Fertigkeiten allgemein kognitive Fähigkeiten, Gedächtnisleistungen, visuell-räumliche Funktionen, die Aufmerksamkeit sowie das Lesen und Schreiben erfasst. Weil die Mathematikangst weit verbreitet ist und zu einer psychischen Beeinträchtigung führen kann, wird häufig auch die Mathematikangst erfragt. Innerhalb eines letzten Termins wird ein Abschlussgespräch geführt, bei dem die Ergebnisse und mögliche Massnahmen besprochen werden. Alle Befunde werden schliesslich in einem Bericht zusammengefasst.

Fragestellungen und Hypothesen

Die Diagnostik der Dyskalkulie ist noch weniger fortgeschritten als beispielsweise diejenige der LRS. Inzwischen wurden zwar Konzepte wie jenes der S3-Leitlinien entwickelt und es liegen einige Diagnoseinstrumente vor, insgesamt ist das Ausmass an validen Diagnoseinstrumenten über die gesamte Altersspanne jedoch noch mangelhaft, was eine differenzierte Diagnosestellung und entsprechende Interventionen erschwert. Und obwohl die basisnumerischen Fertigkeiten ein Kerndefizit von Rechenstörungen darstellen, sind erstaunlich wenige Diagnoseinstrumente für deren Erfassung vorhanden. Eines davon ist der BM 4-8, der aufzeigt, ob eine Person den Basisstoff der Mathematik verstanden hat. Das Verfahren wird innerhalb der Dyskalkulie-Abklärungen am Kinderspital Zürich häufig verwendet und erlaubt eine differenzierte Testinterpretation. Da Kenntnisse hinsichtlich des Einflusses durch den Aufgabentyp und der verwendeten Rechenstrategien auf die Leistung bei basisnumerischen Aufgaben kaum vorhanden sind, diese für ein differenziertes Bild der Diagnosestellung sowie der Fördermöglichkeiten und Empfehlungen jedoch eine wesentliche

Rolle spielen dürften, wurde in der vorliegenden Studie angestrebt, das Lösungsverhalten beim BM 4-8 von Kindern und Jugendlichen mit und ohne Dyskalkulie genauer zu analysieren. Aufgrund der Resultate sollten basisnumerische Aufgaben identifiziert werden können, welche gut zwischen Personen mit und ohne Dyskalkulie trennen und welche zukünftig möglicherweise für einen ersten Eindruck anhand eines Screening-Verfahrens verwendet werden könnten. Zudem standen mögliche Zusammenhänge mit weiteren Faktoren wie Mathematikangst, der visuell-räumlichen Merkspanne, Aufmerksamkeits- und Intelligenzleistungen, der Klassenstufe und dem Geschlecht im Interesse. Gerade hinsichtlich der Persistenz der Störung interessierte zudem, inwiefern sich ein Entwicklungsverlauf von basisnumerischen Fertigkeiten aufzeigen lässt, auf denen schlussendlich weitere mathematische Kompetenzen aufbauen. Schliesslich stand im Interesse, ob sich anhand des Lösungsverhaltens der DD bestimmte Fehlermuster oder Subgruppenbildungen innerhalb der Dyskalkulie-Gruppe aufzeigen lassen.

Die erläuterten theoretischen Betrachtungen und weiterführende Überlegungen führten zu folgenden Fragestellungen, spezifizierten Hypothesen und Annahmen:

1. Gibt es einen signifikanten Unterschied der Leistung beim Lösen von basisnumerischen Aufgaben hinsichtlich der Gesamtpunktezahls zwischen Personen mit und ohne Dyskalkulie? Falls Unterschiede beim Lösen von basisnumerischen Aufgaben resultieren, in welchen Aufgaben des BM 4-8 unterscheiden sich die DD signifikant von der KG? Zeigen sich signifikante Unterschiede bezüglich der Aufgabenart, dem Anforderungsniveau oder den Inhaltsbereichen zwischen den DD und der KG?

H1 a: Es gibt einen signifikanten Unterschied der Gesamtpunktezahls zwischen Personen mit und ohne Dyskalkulie.

- *Annahme und Begründung:* Es sollte ein Unterschied resultieren, weil basisnumerische Fertigkeiten als wesentliches Symptom bei Dyskalkulie identifiziert werden (Siegler, 1996). Zudem wurde ein Teil der Versuchspersonen (Vpn) aufgrund der geringen Gesamtpunktezahls im BM 4-8 zur Dyskalkulie-Gruppe gezählt.

H1 b: Die DD unterscheiden sich beim Lösen der einzelnen Aufgaben aus dem BM 4-8 in einzelnen oder allen Aufgaben signifikant von der KG.

H1 c: Es lassen sich signifikante Unterschiede in Bezug auf die Aufgabenart, Inhaltsbereiche und Anforderungsniveaus zwischen DD und KG aufzeigen.

- *Annahme und Begründung:* Die DD sollten sich zumindest bei einzelnen Aufgaben bezüglich der Lösung signifikant von der KG unterscheiden, weil die basisnumerischen

Aufgaben ein wichtiges Symptom von Dyskalkulie darstellen (Siegler, 1996). Dabei dürften verschiedene Aufgabenarten Schwierigkeiten bereiten (Drechsler & Günther, 2018). Aufgrund der Testentwicklung des BM 4-8 (Moser Opitz et al., 2010) kann davon ausgegangen werden, dass die Aufgaben des höheren Anforderungsniveaus von DD im Mittel signifikant schlechter gelöst werden als von der KG.

2. Gibt es einen signifikanten Unterschied bezüglich der Anwendung von effizienten Rechenstrategien und Faktenwissen zwischen Menschen mit und ohne Dyskalkulie? In welchen Aufgaben können DD im Vergleich zur KG keine effizienten Rechenstrategien und/oder Faktenwissen anwenden?

H2: Es gibt einen signifikanten Unterschied bei der Anwendung von Rechenstrategien und hinsichtlich des Abrufes von Faktenwissen beim Lösen von basisnumerischen Aufgaben zwischen Menschen mit und ohne Dyskalkulie.

- *Annahme und Begründung:* Laut der Metaanalyse von Haberstroh und Schulte-Körne (2019) bestehen bei DD Schwierigkeiten beim Aufbau von Faktenwissen und bei der Entwicklung von Strategien. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass sich die Anwendung von Rechenstrategien und Faktenwissen auch hinsichtlich basisnumerischer Aufgaben zwischen Menschen mit und ohne Dyskalkulie signifikant unterscheidet, was sich in einer geringeren relativen Gesamtzusatzpunktezahl bei Menschen mit Dyskalkulie äussern dürfte. Zwischen welchen Aufgaben sich die angewendeten Rechenstrategien und der Faktenabruf unterscheidet, soll hier explorativ ergründet werden.

3. Gibt es einen Zusammenhang zwischen der Gesamtleistung im BM 4-8 und der Ausprägung der Mathematikangst sowie der domänenübergreifenden Fähigkeiten (visuell-räumliche Merkspanne, Aufmerksamkeit und IQ)? Unterscheiden sich dabei die Zusammenhänge der Gesamtleistung des BM 4-8 und der Mathematikangst sowie den domänenübergreifenden Fähigkeiten zwischen den DD und der KG?

H3 a: Es gibt einen Zusammenhang zwischen der Gesamtleistung im BM 4-8 und der Ausprägung der Mathematikangst sowie der domänenübergreifenden Fähigkeiten.

H3 b: Es gibt einen signifikanten Unterschied bezüglich des Zusammenhangs der Gesamtleistung des BM 4-8 und der Mathematikangst sowie den domänenübergreifenden Fähigkeiten zwischen den DD und der KG.

- *Annahme und Begründung:* Mathematikangst ist bei DD aufgrund der häufigen und anhaltenden negativen Erfahrungen weit verbreitet (Dowker et al., 2016). Deshalb kann

davon ausgegangen werden, dass sich ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen dem Lösen der basisnumerischen Aufgaben und der Ausprägung der Mathematikangst beobachten lässt. Des Weiteren kann davon ausgegangen werden, dass die Unterschiede bezüglich des Zusammenhangs der Gesamtleistung des BM 4-8 und der Mathematikangst zwischen den DD und der KG signifikant unterschiedlich ausfallen. DD dürften aufgrund ihrer langjährigen negativen Erfahrungen grössere Ängste in Bezug auf Mathematik entwickelt haben (Krinzinger, Kaufmann & Willmes, 2009). Während der letzten Jahre hat sich zudem gezeigt, dass nicht nur die domänenspezifischen Fertigkeiten bei Dyskalkulie defizitär ausfallen. Gerade der Bezug zur defizitären Leistung der Aufmerksamkeit (zum Beispiel Passolunghi et al., 2005) und der Intelligenz (Praet, Titeca, Ceulemans & Desoete, 2013) wurden mehrfach erwähnt. Diese Zusammenhänge wurden unter anderem auch in Bezug auf eine mögliche Unterteilung in Subgruppen berichtet (von Aster, 2000) oder auf häufig vorkommende Komorbiditäten (Landerl, Vogel et al., 2017). Folglich kann davon ausgegangen werden, dass sich Zusammenhänge zwischen der Gesamtleistung im BM 4-8 und der Aufmerksamkeit sowie dem IQ aufzeigen lassen und die Hypothese angenommen werden kann.

4. Lässt sich eine Veränderung in der Gesamtleistung des BM 4-8 im Laufe der Entwicklung der DD je nach Klassenstufe beobachten?

H4: Es gibt einen Zusammenhang zwischen der Gesamtleistung des BM 4-8 und der Klassenstufe bei den DD.

- *Annahme und Begründung:* Die basisnumerischen Fertigkeiten werden bereits früh im Leben erworben und sollten während den ersten Klassenstufen gefestigt werden (Dehaene, 2011). Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die defizitären basisnumerischen Fertigkeiten, welche als typisches Symptom bei Dyskalkulie beschrieben werden, auch bei höheren Klassenstufen nicht normgerecht resultieren. Einerseits könnte es sein, dass auch DD im Laufe der Entwicklung Fortschritte in den basisnumerischen Fertigkeiten aufweisen, die jedoch nicht das Niveau von Menschen ohne Dyskalkulie erreichen (Drechsler & Günther, 2018). Andererseits könnte jedoch auch beobachtet werden, dass der Zusammenhang der Gesamtleistung des BM 4-8 und der Klassenstufe nicht signifikant unterschiedlich ausfällt und sich die Leistung über die Klassenstufen nicht signifikant verbessert.

5. Sind geschlechterspezifische signifikante Unterschiede in der Gesamtleistung im BM 4-8 ersichtlich?

H5: Es gibt keinen signifikanten Unterschied bezüglich der Gesamtleistung im BM 4-8 zwischen Jungen und Mädchen.

- *Annahme und Begründung:* Über die geschlechterspezifischen Unterschiede der Leistung im Bereich der Mathematik wurden verschiedene, teilweise auch widersprüchliche, Studienergebnisse präsentiert (Fischbach et al., 2013; Reigosa-Crespo et al., 2012; von Aster et al., 2005). Die Mehrheit der Studien kommt dabei zum Schluss, dass es kaum signifikante Geschlechterunterschiede beim Rechnen geben dürfte. Falls sie doch beobachtet werden, dann sollten eher die Jungen im Vergleich zu den Mädchen eine höhere Leistung erreichen (Niklas & Schneider, 2012).

6. Lässt sich bei Kindern und Jugendlichen mit einer Dyskalkulie auf Verhaltensebene ein Fehlermuster bei der Bearbeitung der Rechenaufgaben aus dem BM 4-8 beobachten? Welche Rechenaufgaben werden besonders häufig falsch gelöst? Betreffen die Fehler mehrheitlich die gleichen oder unterschiedliche Aufgaben? Lassen sich dabei Unterschiede aufgrund der Aufgabenart, der Inhaltsbereiche oder des Anforderungsniveaus beobachten?

- *Annahme und Begründung:* Diese Fragestellung soll explorativ untersucht werden. Einerseits könnte es sein, dass sich die beobachteten Fehler zwischen den DD wenig unterscheiden, was auf typische Symptome der Dyskalkulie zurückgeführt werden könnte (Dilling et al., 2014). Andererseits zeigt sich das Störungsbild auch sehr heterogen und wird an Vpn verschiedener Klassenstufen untersucht, was zu einer unterschiedlichen Lösungsfertigkeit respektive einem heterogenen Lösungsverhalten führen dürfte. Inwiefern die Aufgabenart, das Anforderungsniveau oder die Inhaltsbereiche mit Fehlern in Verbindung gebracht werden können, ist bis anhin unklar.

7. Gibt es spezifische Einflussfaktoren auf die Leistung beim Lösen von basisnumerischen Aufgaben, aufgrund derer sich die DD in bestimmte Gruppen einteilen lassen? Gibt es Gemeinsamkeiten von DD, welche die Aufgaben ähnlich gelöst haben?

- *Annahme und Begründung:* Auch diese Fragestellung soll explorativ ergründet werden. In der Literatur lassen sich verschiedene mögliche Subtypenbildungen von DD beschreiben, wobei die Befundlage bis heute uneinheitlich bleibt (Geary & Hoard, 2005; Von Aster, 2000; Wilson & Dehaene, 2007). Zudem sind Komorbiditäten häufig (Landerl, Vogel et al., 2017), was ebenfalls einen Einfluss auf die Ergebnisse haben könnte.

Methoden

Studiendesign. Bei der Untersuchung handelt es sich um eine querschnittliche Verhaltensstudie, welche zum Ziel hat, die Aufgaben des BM 4-8 hinsichtlich des Lösungsverhaltens von Kindern und Jugendlichen mit und ohne Dyskalkulie zu analysieren. Dafür wurden Vergleiche zwischen den Gruppen (DD vs. KG) vorgenommen, weshalb ein Between-Subjects-Design vorliegt. Zur Beantwortung einiger Fragestellungen wurde zudem ein exploratives Vorgehen gewählt, da Kenntnisse aus der Forschung fehlen, widersprüchlich oder nur spärlich vorhanden sind. Nebst dem BM 4-8 fand die Erfassung weiterer Daten aus verschiedenen Intelligenztests, der Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung (TAP), des Corsi-Block-Tapping-Tests (Corsi) sowie des Mathematikangstinterviews (MAI) statt. Von den Vpn lag bereits eine unterschriebene Einverständniserklärung vor oder wurde noch eingeholt. Alle Daten wurden anonymisiert, indem die Vpn mit einer zufälligen Nummer gekennzeichnet wurden, und auf REDCap, einem elektronischen Datenerfassungstool, gespeichert. Die Studie wurde von der Kantonalen Ethikkommission Zürich bewilligt.

Stichprobe und Rekrutierung. Die Vpn entstammen zwei MRT-Studien, die im Zentrum für MR-Forschung des Kinderspital Zürichs durchgeführt wurden (Karin Kucian et al., 2018; McCaskey, von Aster, O’Gorman & Kucian, 2020). Zudem wurden Kinder und Jugendliche eingeschlossen, welche seit März 2018 bis Juli 2020 im Rahmen von Dyskalkulie-Abklärungen im Dyskalkuliezentrum untersucht wurden und dabei den BM 4-8 gelöst hatten. Zur Bildung einer KG wurden schliesslich weitere Vpn von Frau Moser-Opitz hinzugenommen, die in der Testphase der Entwicklung des ursprünglichen BM 4-8 den Test absolviert haben und uns freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurden (Moser Opitz et al., 2010). Diese wurden nebst dem Kriterium des Gesamtwertes des BM 4-8 aufgrund ihres Geschlechtes und Alters zufällig ausgewählt, so dass die KG schliesslich hinsichtlich dieser demographischen Daten möglichst der Dyskalkulie-Gruppe entsprach. Zur Bildung der Gruppen wurde prioritär das klinische Kriterium angewandt. Diese Entscheidung wurde getroffen, weil die Diagnose nebst dem mathematischen Basisstoff weitere Faktoren wie die Klassenstufe, den Schulbereich oder weitere mathematische Leistungen berücksichtigt, welche für eine Diagnosestellung wichtig sind. Damit entspricht die klinische Diagnose auch eher dem Alltag der Betroffenen. Bei den Vpn ohne Diagnose wurde auf die Einteilung des Gesamtwertes des BM 4-8 anhand des kritischen Wertes zurückgegriffen. Dabei wurden jene Personen, welche den mathematischen Basisstoff nicht verstanden haben (< 67 Punkte), der Dyskalkulie-Gruppe zugeteilt, während jene mit grenzwertigen Ergebnissen zwischen 67 und

72 Punkten der KG zugewiesen wurden. Dieses Vorgehen wurde gewählt, damit für das Vorliegen einer möglichen Rechenstörung ein strikteres Kriterium und damit eine klarere Abgrenzung vorliegt. Als Ausschlusskriterien galten neurologische, psychiatrische und entwicklungsbedingte Störungen. Der Ausschluss von vier Vpn der Dyskalkulie-Gruppe mit einem $IQ < 85$ (kleinster $IQ = 73$) wurde in Erwägung gezogen, dann aber aufgrund des Einbezugs möglichst aller untersuchten Personen und der engen Zusammenhänge zwischen Mathematikleistung und IQ unterlassen. Zudem betonen die Autoren des BM 4-8, auf die Bestimmung einer Diskrepanz zum IQ zu verzichten. Vorsichtshalber wurden die Analysen jedoch auch ohne diese Vpn gerechnet, wobei sich keine relevanten Unterschiede ergaben.

Insgesamt resultierten je 43 Vpn pro Gruppe. Die Dyskalkulie-Gruppe bestand aus 36 Mädchen und sieben Jungen im Alter zwischen 7.75 und 16.50 Jahren ($M = 15.45$ Jahre, $SD = 2.36$), die KG aus 32 Mädchen und 11 Jungen im Alter zwischen 8.67 und 16.50 Jahren ($M = 13.86$ Jahre, $SD = 1.35$). Es zeige sich kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Gruppenzugehörigkeit und dem Geschlecht (Chi-Quadrat(1) = 0.93, $p = .517$, $n = 86$), jedoch resultierte ein signifikanter Unterschied hinsichtlich des IQ (Mann-Whitney-U-Test: $U = 423.00$, $p < .001$) mit einer mittleren bis starken Effektstärke ($r = .46$) sowie dem Alter (Mann-Whitney-U-Test: $U = 575.50$, $p = .003$) mit einer mittleren Effektstärke ($r = .33$) zwischen DD und KG.

Neuropsychologische Testverfahren.

BASIS-MATH 4-8. Der BM 4-8 (Moser Opitz et al., 2010) ist ein Einzeltestverfahren, mit dessen Hilfe überprüft werden kann, inwieweit Schüler der vierten bis achten Klasse über zentrale Kenntnisse der Grundschulmathematik (mathematischer Basisstoff) verfügen, was Einfluss auf den weiteren mathematischen Lernprozess ausübt. Der Test erlaubt eine differenzierte Testinterpretation und bildet damit die Grundlage für die weiterführende Diagnostik und Förderplanung. Er besteht aus 48 Aufgaben aus drei Anforderungsniveaus, die fünf Kompetenzbereichen zugeordnet werden können:

1. Zählkompetenz: vorwärts zählen in Zweierschritten, rückwärts zählen in Zehnerschritten, vorwärts zählen in Hunderterschritten
2. Verständnis Teil-Ganzes: Ergänzungsaufgaben, Textaufgaben
3. Einsicht in das Dezimalsystem: Bündeln, Entbündeln von Kategorien, Zahlenstrahl, Stellenwert
4. Mathematisierungsfähigkeit beziehungsweise Problemlösen: Operationsverständnis von Multiplikation und Division, Textaufgaben

5. Strategieerfassung: Rechenwege bei Additionen, Subtraktionen, Ergänzungsaufgaben, Verdoppelungs- und Halbierungsaufgaben, Multiplikationen, Divisionen, halbschriftliche Additionen und Subtraktionen

Die Aufgaben können hinsichtlich einer qualitativen Auswertung zudem sieben Inhaltsbereichen zugeordnet werden:

Inhaltsbereich 1: Addieren, Subtrahieren, Ergänzen und Verdoppeln mit einfachen Zahlen

Inhaltsbereich 2: Multiplizieren und Dividieren mit einfachen Zahlen

Inhaltsbereich 3: Beziehung Teil-Ganzes

Inhaltsbereich 4: Zählen

Inhaltsbereich 5: Grundoperationen mit grossen Zahlen und Übergängen

Inhaltsbereich 6: Mathematisieren und Textaufgaben

Inhaltsbereich 7: Dezimalsystem

Der Test ist kriteriumsorientiert gestaltet, weshalb nicht das Erreichen bestimmter Lernziele im Vergleich zu einer Altersgruppe massgebend ist, sondern das Erreichen eines Grenzwertes. Das Kriterium *mathematischer Basisstoff verstanden* gilt bei > 73 Punkten, während das Kriterium bei < 67 Punkten als nicht verstanden gilt. Der Toleranzbereich liegt zwischen 67 und 73 Punkten. Wichtig ist, dass vor allem im unteren Leistungsbereich, also bei der Erfassung von Personen mit schwacher Mathematikleistung, ein differenziertes Bild dargestellt werden kann. Denn die Auswertung beinhaltet die Gesamtleistung, den verwendeten Rechenweg und die mathematischen Inhaltsbereiche. Zudem werden für einen effizienten Rechenweg Zusatzpunkte vergeben. Punkte werden erzielt, wenn entweder Faktenwissen innerhalb von 3 beziehungsweise 5 Sekunden abgerufen werden kann oder effiziente Strategien wie Ableiten oder Zerlegen angewendet werden. Für die Analyse wurden der Gesamtwert des Testes (0-84 Punkte) sowie die Werte der einzelnen Aufgaben (0-1 oder 0-2 Punkte) einbezogen. Der Gesamtwert aller Zusatzpunkte wurde relativ erfasst, das heisst im Verhältnis zu den Aufgaben, die überhaupt richtig gelöst wurden, was auf das Ausmass der Anwendung von effizienten Strategien hinweist (0-100 %). Schliesslich wurden für eine differenziertere Analyse auch noch die Punktwerte je Aufgabenart, Inhaltsbereich und Anforderungsniveau berechnet. Der BM 4-8 wurde von allen Vpn absolviert. In Anhang A sind die Aufgaben beschrieben, hinsichtlich Aufgabenart, Inhaltsbereich sowie Anforderungsniveau eingeordnet und mögliche Zusatzpunkte eingetragen.

Intelligenztests. Zur Erfassung des IQ wurde je nach Alter der Kinder und Jugendlichen auf verschiedene Tests zurückgegriffen: Grundintelligenztest Skala 2 –

Revision (CFT 20-R, Weiss, 2006; 19 Vpn), Hamburg-Wechsler Intelligenztest für Kinder (HAWIK-IV, Petermann & Petermann, 2007; 46 Vpn), Intelligence and Development Scales-2, (IDS-2, Grob & Hagmann-von Arx, 2018; 2 Vpn), Kaufman Assessment Battery for Children (K-ABC, Kaufman & Kaufman, 2004; 1 Vpn), Wechsler Intelligenztest für Kinder in deutscher Fassung (WISC-V, Petermann, 2017; 4 Vpn) und Wechsler Intelligenztest für Erwachsene in deutscher Fassung (WAIS-IV, Petermann, 2012; 13 Vpn). Die Testbatterien messen anhand mehrerer Untertests einzelne Bereiche der Intelligenz, die dann zur Berechnung eines Gesamt-IQ verwendet werden können. Für die Analyse wurde eine IQ-Variable aus den Prozenträngen (PR) der gemittelten Untertests gebildet (PR 0-100). Für den HAWIK-IV, WISC-V und WAIS-IV wurden die Untertests Mosaiktest, der das visuell-räumliche Denken erfasst, Gemeinsamkeiten finden, der das Sprachverständnis prüft, sowie der Matrizenstest, der das fluide Schlussfolgern misst, verwendet. Von einer Vpn lag kein IQ vor.

TAP. Die TAP (Zimmermann & Fimm, 1993) ist ein rechnergestütztes Verfahren für Personen zwischen 6 und 90 Jahren und erfasst verschiedene hoch spezifische Teilfunktionen der Aufmerksamkeit, um eine differenzierte Diagnostik von Aufmerksamkeitsstörungen vornehmen zu können. Innerhalb der vorliegenden Studien wurden die Untertests *Alertness* sowie *Go/NoGo* verwendet. Unter *Alertness* versteht man den allgemeinen Wachzustand, der notwendig ist, um adäquat und schnell auf Anforderungen reagieren zu können. Dabei wird die Reaktionszeit bis zum Drücken eines Zielreizes ohne Hinweisreiz (intrinsische *Alertness*) und mit Hinweisreiz (phasische *Alertness*, zeitliche Ausrichtung des Aufmerksamkeitsfokus) gemessen. In der vorliegenden Studie wurde aus dem Mittelwert des Prozentranges der intrinsischen *Alertness* und der phasischen *Alertness* die Aufmerksamkeitsvariable gebildet (PR 0-100), welche die allgemeine Bereitschaft, möglichst rasch und richtig auf einen Reiz zu reagieren, wiedergibt.

Der Untertest *Go/NoGo* misst die Fähigkeit, unter Zeitdruck eine angemessene Reaktion auszuführen und gleichzeitig einen inadäquaten Verhaltensimpuls zu kontrollieren, was gerade in Bezug auf die Verhaltenskontrolle einen wesentlichen Aspekt darstellt. Dabei wird die spezifische Fähigkeit zur Unterdrückung einer nicht-adäquaten Reaktion überprüft (Inhibitionsfähigkeit). Das Paradigma ist dermassen gestaltet, dass zwei ähnliche Reize dargeboten werden, während auf den einen mit Tastendruck reagiert werden muss, hingegen auf den zweiten Reiz nicht reagiert werden darf. Für die Analysen wurde eine Variable mit dem Prozentrang des Medians (*Mdn*) des *Go/NoGo*-Wertes gebildet (PR 0-100) und eine

Variable bestehend aus den Anzahl Fehlern, das heisst wie oft eine Person fälschlich die Taste gedrückt hat (0-∞). Die Werte geben einen Hinweis hinsichtlich der Inhibitionsfähigkeit. Die Variable war von 64 Vpn vorhanden.

Corsi. Mit dem in der Klinik häufig verwendeten Corsi (Corsi, 1972) kann die visuell-räumliche Merkspanne ab 6 Jahren erfasst werden. Dabei werden auf einem Brett sequentiell Blöcke berührt, während die Vpn zuschaut. Nach einer gezeigten Sequenz soll die Vpn die beobachtete Sequenz in der gleichen Reihenfolge ebenfalls nachtippen. Die Sequenzlänge nimmt im Verlauf der Testdurchführung zu (3-9 Blöcke). Mit diesem Vorgehen, das in der Studie verwendet wurde, wird die unmittelbare Merkspanne gemessen. Anhand des Mittelwertes des Basisscores (längste richtig nachgetippte Sequenz eines ganzen Blockes) und der Blockspanne (längste richtig nachgetippte Sequenz einer einzelnen Aufgabe) wurde die Variable für die visuell-räumliche Merkspanne gebildet (0-9 Punkte). Die Variable wurde bei 29 Vpn erhoben.

MAI. Zur Erfassung der vorhandenen Mathematikangst wurde das MAI (Kohn, Richtmann et al., 2013) eingesetzt. Der Fragebogen erfasst einerseits die Angstintensität und andererseits deren Auswirkung auf verschiedene Angstebenen (affektive, kognitive, Verhaltens- und physiologische Ebene). Das Interview soll eine Förderung in Bezug auf den emotionalen Zustand ermöglichen, der für den Lernerfolg wesentlich sein kann, und das Verständnis für die Schwierigkeiten verbessern. Kinder schätzen dabei ihre Angst in Bezug auf vier rechenspezifische Situationen, die sprachlich und mittels Bildern präsentiert werden, anhand eines Angstthermometers mit Werten von 0 bis 10 Punkten ein. Die mögliche Gesamtpunktezahl liegt zwischen 0 und 60 Punkten. Die Werte wurden mit internationalen Referenzgruppen normiert, deren Mittelwert 19.76 Punkte und Standardabweichung 15.89 Punkte betrug. Dabei spricht man laut Dybuster von Mathematikängstlichkeit, wenn der erreichte Wert mindestens 1 Standardabweichung über dem Mittelwert der Referenzgruppe liegt, während die Mathematikangst ab einem Wert von 1.5 Standardabweichungen über dem Mittelwert als gegeben gilt. Für die Analyse wurde die Gesamtpunktezahl des MAI als Variable für die Ausprägung der Mathematikangst gebildet (0-60 Punkte) und war von 40 Vpn vorhanden.

Statistische Analyse. Die Daten wurden mit SPSS (Version 26) analysiert. Zur Überprüfung hinsichtlich der Normalverteilung der Variablen und der weiteren Analyseauswahl wurden Normalverteilungstests mit dem Shapiro-Wilk-Test berechnet. Da der grösste Teil der Variablen der Aufgaben aus dem BM 4-8 nicht normalverteilt war,

wurden non-parametrische Tests für alle Items gewählt, um die Einheitlichkeit der Methoden zu gewährleisten. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Aufgaben mit unterschiedlichen Punktezahlen sicherzustellen, wurden die Variablen einer z-Transformation unterzogen.

Weiter wurde, obwohl keine Normalverteilung vorlag, eine Multivariate Varianzanalyse (MANOVA) durchgeführt, damit die IQ-Variable als Kovariate in die Analyse eingeschlossen und deren Einfluss besser eingeschätzt werden konnte. Die Gruppenunterschiede hinsichtlich der Leistungen im BM 4-8 wurden dann jedoch aufgrund der fehlenden Normalverteilung anhand eines Mann-Whitney-U-Tests vorgenommen und mit einer Bonferroni-Korrektur für Mehrfachvergleiche korrigiert. Anhand eines Chi-Quadrat-Tests wurde geschaut, ob sich die Gruppen hinsichtlich ihres Geschlechts unterscheiden, mit dem Mann-Whitney-U-Test wurden mögliche Gruppenunterschiede bezüglich des IQ-Wertes und Alters berechnet.

Für die Berechnungen von Zusammenhängen wurden aufgrund der fehlenden Normalverteilung Korrelationsanalysen nach Spearman gerechnet und dabei wurde von ungerichteten Zusammenhängen ausgegangen. Zur Einschätzung der Grösse der gefundenen Zusammenhänge wurde die Einteilung nach Cohen (1992) verwendet, wonach $r = .10$ einem schwachen, $r = .30$ einem mittleren und $r = .50$ einem starken Effekt entspricht. Für den Vergleich zweier Korrelationskoeffizienten wurde eine z-Transformation nach Fisher berechnet. Angemerkt werden soll, dass zur Beurteilung des möglichen Entwicklungsverlaufs der Leistung auf die Klassenstufe zurückgegriffen wurde, da eher die Beschulung als das Alter eine Rolle hinsichtlich des vorhandenen mathematischen Basisstoffs spielen dürfte. Auf die Prüfung des Zusammenhanges zwischen der Art des IQ-Tests und der Leistung im BM 4-8 wurde verzichtet, weil die Verteilung der Testhäufigkeit sehr unterschiedlich ausfiel. Inwiefern ein Zusammenhang der Mathematikleistung mit Komorbiditäten bestand, konnte aufgrund mangelnder Informationen leider nicht erfasst werden.

In einem weiteren Schritt wurde eine Itemanalyse aller Aufgaben des BM 4-8 durchgeführt. Deskriptiv wurde der Schwierigkeitsindex ($P = \bar{X} / \max$) berechnet, der den prozentuellen Anteil an der maximal erreichbaren Punktezahl einer Aufgabe angibt. Damit wird ersichtlich, wie hoch der prozentuelle Anteil jener Vpn liegt, welche die Aufgabe richtig gelöst haben. Danach wurden anhand einer Reliabilitätsanalyse das Cronbachs Alpha (α , gibt die Reliabilität in Form der internen Konsistenz respektive die untere Grenze für die Reliabilität an und kann Werte zwischen $-\infty$ und 1 annehmen) und die korrigierten Trennschärfen (r_{it} , zeigt, wie hoch jedes Item mit allen anderen Items korreliert) ermittelt.

Eine hohe Trennschärfe der Items weist auf eine gute Differenzierung von Personen mit hoher im Vergleich zu tiefer Merkmalsausprägung (das Lösungsverhalten) hin und ist im Hinblick auf ein Diagnoseverfahren, das zwischen Personen mit und ohne Dyskalkulie unterscheiden soll, wesentlich. Das Cronbachs Alpha sollte $> .70$, besser $> .80$ betragen, während akzeptable Werte für die Trennschärfe $> .30$ und gute $> .40$ liegen sollten.

Schliesslich wurden jene Aufgaben, die eine Trennschärfe $> .60$ aufweisen, mit jenen Aufgaben abgeglichen, welche im Mann-Whitney-U-Test signifikant ausfielen. Damit sollten jene Aufgaben, die am besten zwischen den Gruppen unterschieden haben, ermittelt werden.

Um zu sehen, inwiefern einzelne Items sich anhand des Lösungsverhaltens der DD zu Faktoren zusammenschliessen lassen, wurde eine explorative Faktorenanalyse (Hauptkomponentenanalyse mit Oblimin-Rotation) mit z-standardisierten Werten vorgenommen. Zur Prüfung der Eignung der Daten wurde das Kriterium von Kaiser, Meyer und Olkin (KMO) angewandt, wobei der KMO-Wert als Mass für partielle Korrelationen zwischen den Variablen verwendet werden kann. Bei einem Wert von mindestens $.60$ kann die Faktorenanalyse fortgeführt werden. Weiter wurde anhand des Bartlett-Tests die Nullhypothese geprüft, ob die Variablen unkorreliert sind. Ein signifikantes Ergebnis weist auf korrelierte Variablen hin, weshalb die Analyse fortgesetzt werden kann. Zur Bestimmung der Anzahl Faktoren wurde das Kaiser-Kriterium mit der Eigenwert-Regel angewandt (nur Faktoren mit Eigenwert > 1.0 werden extrahiert) sowie der Screeplot angeschaut. Für die Interpretation der Faktoren wurde anhand der rotierten Komponentenmatrix die Zuordnung der Variablen (Aufgaben des BM 4-8) auf die Faktoren angeschaut. Dabei gelten Faktorladungen von $\pm .30$ bis $\pm .40$ als minimal akzeptabel. Von Querladungen wird gesprochen, wenn eine Variable zwei oder mehr Faktorladungen aufweist, die stärker als $\pm .30$ oder $\pm .40$ sind, was darauf hinweist, dass ein Item mit mehreren Faktoren zusammenhängt.

Auf Personenebene wurde zur explorativen Untersuchung, inwiefern sich DD anhand ihres Lösungsverhaltens gruppieren lassen, eine hierarchische Clusteranalyse durchgeführt. Damit möglichst grosse Unterschiede zwischen den Clustern resultierten, wurde die Methode *entferntester Nachbar* (das Maximum aller möglichen Distanzen zwischen den Datenpunkten in den Clustern) und das Mass *euklidische Distanz* (einfache Luftliniendistanz) gewählt. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Variablen zu gewährleisten, wurden diese z-transformiert. Zur Bestimmung der Anzahl Cluster wurde das Dendrogramm betrachtet, welches den höchsten Zuwachs der Heterogenität bestimmt. Ausserdem wurden inhaltliche

Überlegungen vorgenommen, wobei aufgrund des heterogenen Störungsbildes eine grössere Anzahl an Clustern angestrebt wurde.

Ergebnisse

Deskriptive Statistik. Um einen ersten Überblick über das Lösungsverhalten aufzuzeigen, sind in Anhang B die erreichte Gesamtpunktezah, die Zusatzpunkte gesamt, die Punkte je Aufgabe sowie die erreichte mittlere Leistung je Aufgabenart, Inhaltsbereich und Anforderungsniveau aus dem BM 4-8 je Gruppe aufgelistet. Dabei wurden Mittelwert und Standardabweichung berechnet, die maximal mögliche Punktezah, die Schwierigkeit der einzelnen Aufgaben sowie die Trennschärfe angegeben. Zudem wurde der Prozentrang des IQ, der Alertness und des Go/Nogo-Tests, die Sequenzlänge im Corsi und der Summenwert der Mathematikangst aus dem MAI erwähnt. Anhand dieser Daten wird ersichtlich, dass die DD in allen Aufgaben des BM 4-8 sowie den anderen neuropsychologischen Tests eine geringere Punktezah erreichten. Während die KG bei 10 Aufgaben die volle Punktezah erreicht, ist dies bei den DD nie der Fall. Zudem ist die Standardabweichung der Daten bei den DD bis auf die Aufgabe 8f (Dezimalsystem grosse Zahlen) und den Wert des Corsi grösser als bei der KG, was auf eine breitere Streuung der Daten hinweist. Die Schwierigkeiten der einzelnen Aufgaben zeigen folglich das gleiche Bild: die Lösungswahrscheinlichkeit ist bei der KG für alle Aufgaben grösser. Während bei der KG 11 Aufgaben mit einer Schwierigkeit von $P = 100$ gelöst wurden, 32 Aufgaben mit $P > 90$ und eine Aufgabe mit $P < 60$, waren es bei den DD keine Aufgaben mit $P = 100$, eine Aufgabe mit $P > 90$ und 17 Aufgaben mit $P < 60$.

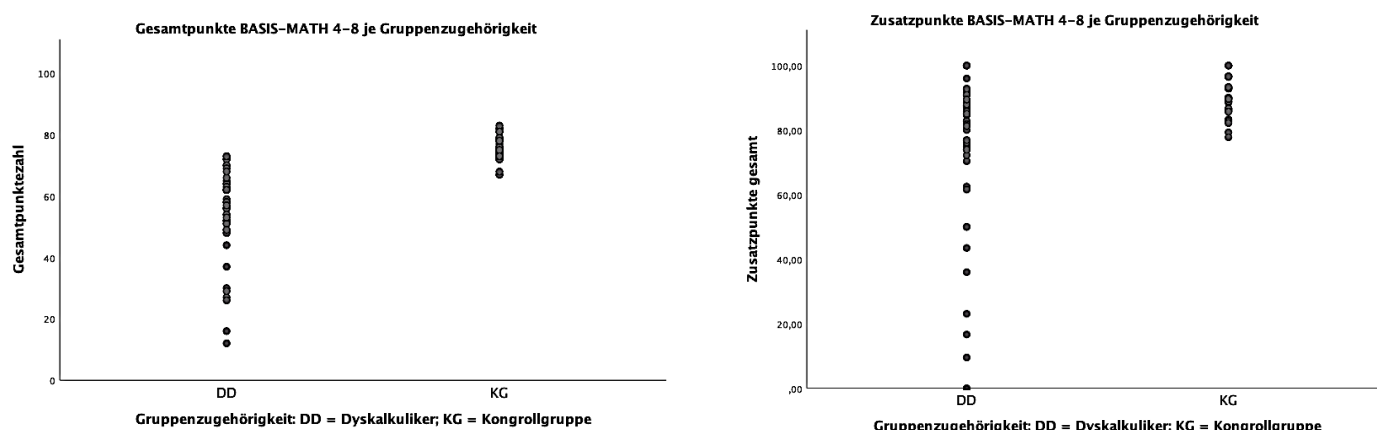


Abbildung 12. Punkteverteilung des BASIS-MATH 4-8. Zu sehen ist die Verteilung der erreichten Gesamtpunktezah (links) sowie der erreichten Zusatzpunktezah gesamt (rechts) je Gruppe (DD vs. KG). Sowohl die Gesamtpunktezah (Mann-Whitney-U-Test: $U = 39.50$, $p = < .001$) wie auch die Zusatzpunktezah gesamt (Mann-Whitney-U-Test: $U = 388.50$, $p = < .001$) unterscheiden sich signifikant zwischen den Gruppen.

In Abbildung 12 wird ersichtlich, dass sowohl bei der Gesamtpunktezahle wie auch der gesamten Zusatzpunktezahle die Werte der erreichten Punkte bei den DD weit streuen, während sie bei der KG auf hohem Niveau gering streuen.

Gruppenunterschiede.

Basisnumerische Fertigkeiten. Der Mann-Whitney-U-Test wurde durchgeführt, um mögliche Unterschiede in der Leistung im BM 4-8 zwischen den Gruppen aufzuzeigen. Dabei resultiert ein signifikant tieferer Gesamtwert des Tests bei den DD ($Mdn = 22.92$) im Vergleich zur KG ($Mdn = 64.08$) (Mann-Whitney-U-Test: $U = 39.50$, $p < .001$). Die Effektstärke liegt bei $r = .83$, was einem sehr starken Effekt entspricht. Bezüglich der Frage, in welchen Aufgaben sich die DD von der KG unterscheiden, wurde ebenfalls ein Mann-Whitney-U-Test gerechnet. Die Ergebnisse mit den signifikant unterschiedlichen Aufgaben zwischen DD und KG sind in Tabelle 1 dargestellt.

Aufgrund der Gefahr einer Verzerrung durch multiples Testen wurde eine Bonferroni-Korrektur gerechnet und deshalb wurden nur Werte $p_{Bonf} < .001$ als signifikante Unterschiede angenommen. Die Ergebnisse zeigen, dass 27 der 48 Aufgaben aus dem BM 4-8 einen signifikanten Gruppenunterschied aufweisen. Die Effektstärken liegen zwischen $r = .38$ und $r = .66$, was einem mittleren bis starken Effekt entspricht. Aus der deskriptiven Statistik wird ersichtlich, dass beim Lösen die KG stets bessere Leistungen zeigte als die DD. Die Aufgaben, die DD signifikant schlechter lösen als die KG, sind gehäuft Subtraktionen, Ergänzungsaufgaben und Divisionen. Dabei gehören sie den Inhaltsbereichen Grundoperationen mit grossen Zahlen und Übergängen, Addieren, Subtrahieren, Ergänzen und Verdoppeln mit einfachen Zahlen sowie Multiplizieren und Dividieren mit einfachen Zahlen an. Betroffen sind alle Anforderungsniveaus, am häufigsten das Anforderungsniveau I. Keine Unterschiede zeigen sich hinsichtlich des Bereiches Beziehung Teil-Ganzes. Eine Übersicht zeigt Tabelle 2.

Des Weiteren resultieren alle Signifikanztests je Aufgabenart, Inhaltsbereich und Anforderungsniveau zwischen den Gruppen als signifikant (Tabelle 3). Anhand der deskriptiven Statistik kann man also darauf schliessen, dass die DD in all den erwähnten Bereichen eine signifikant schlechtere Leistung erbrachten als die KG.

Tabelle 1

Aufgaben mit signifikanten Unterschieden zwischen DD und KG

| Aufgabe | <i>U</i> | <i>p</i> _{Bonf} | <i>r</i> |
|---|----------|--------------------------|----------|
| 1b Addition (57 + 6) | 648.50 | < .001 | .38 |
| 1c Addition (47 + 36) | 540.50 | < .001 | .49 |
| 1e Addition (849 + 265) | 491.50 | < .001 | .50 |
| 2b Subtraktion (53 - 7) | 624.50 | < .001 | .39 |
| 2c Subtraktion (430 - 70) | 562.00 | < .001 | .47 |
| 2d Subtraktion (701 - 698) | 258.00 | < .001 | .66 |
| 2e Subtraktion (475 - 176) | 502.50 | < .001 | .43 |
| 3a Ergänzen (73 + ... = 100) | 583.50 | < .001 | .45 |
| 3b Ergänzen (90 - ... = 83) | 666.50 | < .001 | .40 |
| 3c Ergänzen (1596 + ... = 1600) | 583.50 | < .001 | .45 |
| 3d Ergänzen (1000 - ... = 670) | 562.00 | < .001 | .47 |
| 4a Verdoppeln (2 * 17) | 621.00 | < .001 | .42 |
| 4d Halbieren (180 : 2) | 645.00 | < .001 | .42 |
| 4e Halbieren (108 : 2) | 626.00 | < .001 | .41 |
| 5b Multiplikation (8 * 9) | 647.50 | < .001 | .39 |
| 5c Multiplikation (30 * 40) | 481.00 | < .001 | .48 |
| 5e Multiplikation (150 * 20) | 562.00 | < .001 | .44 |
| 6a Division (24 : 6) | 522.00 | < .001 | .50 |
| 6c Division (160 : 4) | 688.00 | < .001 | .38 |
| 6d Division (160 : 40) | 666.50 | < .001 | .40 |
| 6e Division (1000 : 8) | 334.00 | < .001 | .59 |
| 6f Division Rechengeschichte (20 : 4 = 5) | 497.50 | < .001 | .46 |
| 7b Zählen (10er Schritte rückwärts; 137 bis 67) | 602.00 | < .001 | .38 |
| 8b Dezimalsystem Bündeln (Zehnerbündel mit 124) | 602.00 | < .001 | .44 |
| 8d Dezimalsystem grosse Zahlen (10 000 - 10) | 559.00 | < .001 | .43 |
| 8e Dezimalsystem grosse Zahlen (100 000 - 100) | 494.50 | < .001 | .46 |
| 9c Textaufgaben (Drei Kuchen kosten 7.20 Fr. Einer = ?) | 573.50 | < .001 | .38 |

Anmerkungen. Ersichtlich sind alle signifikanten Aufgaben des BASIS-MATH 4-8, die laut dem Mann-Whitney-U-Test signifikante Gruppenunterschiede hervorbrachten. DD = Dyskalkuliker; KG = Kontrollgruppe; *U* = Mann-Whitney-U-Wert; *p*_{Bonf} = Signifikanzwert nach Bonferroni-Korrektur; *r* = Effektstärke nach Cohen.

Tabelle 2

Häufigkeit der signifikanten Aufgaben je Aufgabenart, Inhaltsbereich und Anforderungsniveau

| Anforderungen der signifikanten Aufgaben je Aufgabentyp, Inhaltsebene und Anforderungsebene | | | | | | | | | | |
|---|----------|-------------|----------|------------|-----------|----------------|----------|--------|---------------|-------------|
| AA | Addition | Subtraktion | Ergänzen | Verdoppeln | Halbieren | Multiplikation | Division | Zählen | Dezimalsystem | Textaufgabe |
| | 3 (5) | 4 (5) | 4 (5) | 1 (2) | 2 (3) | 3 (5) | 4 (5) | 1 (3) | 3 (10) | 1 (2) |
| | 60% | 80% | 80% | 50% | 66.67% | 60% | 80% | 33.33% | 30% | 50% |
| IB | IB 1 | IB 2 | IB 3 | IB 4 | IB 5 | IB 6 | IB 7 | | | |
| | 9 (13) | 2 (6) | 0 (4) | 1 (3) | 5 (7) | 2 (5) | 3 (8) | | | |
| | 69.23% | 66.67% | 0% | 33.33% | 71.43% | 40% | 37.5% | | | |
| AN | AN I | AN II | AN III | | | | | | | |
| | 17 (29) | 5 (10) | 5 (9) | | | | | | | |
| | 58.62% | 50% | 55.56% | | | | | | | |

Anmerkungen. Beschrieben werden die absoluten und relativen Häufigkeiten der signifikanten Aufgaben, welche im Vergleich zur Gesamtmenge der jeweiligen Aufgaben (Zahl in Klammer) zwischen den Gruppen unterschieden haben. Diese wurden je Aufgabenart, Inhaltsbereich und Anforderungsniveau berechnet.

AA = Aufgabenart; IB = Inhaltsbereich; AN = Anforderungsniveau.

Tabelle 3

Signifikante Unterschiede im Lösungsverhalten zwischen DD und KG je Aufgabenart, Inhaltsbereich und Anforderungsniveau

| | | <i>U</i> | <i>p_{Bonf}</i> | <i>r</i> |
|----|------------------------|----------|-------------------------|----------|
| AA | Addition | 309.00 | < .001 | .59 |
| | Subtraktion | 134.50 | < .001 | .75 |
| | Ergänzen | 375.00 | < .001 | .43 |
| | Verdoppeln | 581.50 | < .001 | .43 |
| | Halbieren | 569.50 | < .001 | .47 |
| | Multiplikation | 313.00 | < .001 | .60 |
| | Division | 220.00 | < .001 | .68 |
| | Zählen | 502.50 | < .001 | .50 |
| | Dezimalsystem | 356.00 | < .001 | .53 |
| | Textaufgaben | 536.50 | < .001 | .38 |
| | Rechengeschichten | 465.00 | < .001 | .47 |
| IB | Inhaltsbereich 1 | 177.00 | < .001 | .72 |
| | Inhaltsbereich 2 | 332.50 | < .001 | .62 |
| | Inhaltsbereich 3 | 377.00 | < .001 | .61 |
| | Inhaltsbereich 4 | 502.50 | < .001 | .45 |
| | Inhaltsbereich 5 | 145.00 | < .001 | .73 |
| | Inhaltsbereich 6 | 368.00 | < .001 | .53 |
| | Inhaltsbereich 7 | 361.00 | < .001 | .53 |
| AN | Anforderungsniveau I | 65.50 | < .001 | .81 |
| | Anforderungsniveau II | 235.50 | < .001 | .66 |
| | Anforderungsniveau III | 151.00 | < .001 | .72 |

Anmerkungen. Ersichtlich sind die signifikanten Gruppenunterschiede des Lösungsverhaltens im BM 4-8 je Aufgabenart, Inhaltsbereich und Anforderungsniveau.

DD = Dyskalkuliker; KG = Kontrollgruppe; AA = Aufgabenart; IB = Inhaltsbereich; AN = Anforderungsniveau; *U* = Mann-Whitney-U-Wert; *p_{Bonf}* = Signifikanzwert nach Bonferroni-Korrektur; *r* = Effektstärke nach Cohen.

Effiziente Strategien und Faktenwissen. Zur Frage, inwiefern sich DD bezüglich einer effizienten Rechenstrategie und dem Abruf von Faktenwissen von der KG unterscheiden, wurde ein Mann-Whitney-U-Test für die Gesamtzusatzpunktezah relativ (also im Verhältnis zu den Aufgaben, die überhaupt richtig resultierten) berechnet. Dabei erreichen die DD signifikant weniger Punkte (*Mdn* = 31.03) als die KG (*Mdn* = 55.97) (Mann-Whitney-U-Test: *U* = 388.50, *p* < .001). Die Effektstärke liegt bei *r* = .50, was einem starken Effekt entspricht. Zusätzlich wurde ein Mann-Whitney-U-Test zum Lösungsverhalten einzelner Aufgaben gerechnet (Tabelle 4), was aufzeigt, bei welchen Aufgaben sich die Gruppen hinsichtlich der Anwendung eines effizienten Rechenweges unterscheiden. 20 von

30 Aufgaben, die mit einem Zusatzpunkt gelöst werden konnten, resultieren signifikant unterschiedlich. Die Effektstärken liegen zwischen $r = .38$ und $r = .52$, was einem mittleren bis starken Effekt entspricht. Werden die entsprechenden Aufgaben hinsichtlich der Aufgabenart, Inhaltsbereiche und Anforderungsniveaus betrachtet (Tabelle 5), lässt sich schlussfolgern, dass sämtliche Aufgaben mit Halbieren signifikant unterschiedlich ausfallen und gehäuft Aufgaben bezüglich Division und Ergänzen. Mit Ausnahme vom Inhaltsbereich Beziehung Teil-Ganzes unterscheiden sich DD und KG bei Aufgaben aller Inhaltsbereiche. Zudem unterscheiden alle Aufgaben aus dem Anforderungsniveau II, viele Aufgaben aus dem Anforderungsniveau I und wenige aus dem Anforderungsniveau III bezüglich der Rechenstrategie zwischen DD und KG. Eine Bonferroni-Korrektur führte dazu, dass nur Werte $p_{Bonf} < .001$ als signifikant angesehen wurden.

Tabelle 4

Aufgaben mit signifikanten Unterschieden im Lösungsverhalten des BM 4-8 hinsichtlich angewendeter Strategie zwischen DD und KG

| Aufgaben | U | p_{Bonf} | r |
|---------------------------------|--------|------------|-----|
| 1b Addition (57 + 6) | 645.00 | < .001 | .40 |
| 1c Addition (47 + 36) | 537.50 | < .001 | .49 |
| 2b Subtraktion (53 - 7) | 623.50 | < .001 | .40 |
| 2c Subtraktion (430 - 70) | 559.00 | < .001 | .47 |
| 2d Subtraktion (701 - 698) | 430.00 | < .001 | .55 |
| 3a Ergänzen (73 + ... = 100) | 580.50 | < .001 | .45 |
| 3b Ergänzen (90 - ... = 83) | 666.50 | < .001 | .40 |
| 3c Ergänzen (1596 + ... = 1600) | 580.50 | < .001 | .45 |
| 3d Ergänzen (1000 - ... = 670) | 559.00 | < .001 | .47 |
| 4a Verdoppeln (2 * 17) | 623.50 | < .001 | .42 |
| 4c Halbieren (18 : 2) | 666.50 | < .001 | .38 |
| 4d Halbieren (180 : 2) | 645.00 | < .001 | .42 |
| 4e Halbieren (108 : 2) | 623.50 | < .001 | .42 |
| 5b Multiplikation (8 * 9) | 645.00 | < .001 | .40 |
| 5c Multiplikation (30 * 40) | 473.00 | < .001 | .49 |
| 5e Multiplikation (150 * 20) | 559.00 | < .001 | .44 |
| 6a Division (24 : 6) | 516.00 | < .001 | .51 |
| 6c Division (160 : 4) | 688.00 | < .001 | .38 |
| 6d Division (160 : 40) | 666.50 | < .001 | .40 |
| 6e Division (1000 : 8) | 451.50 | < .001 | .52 |

Anmerkungen. Ersichtlich sind alle signifikanten Aufgaben des BASIS-MATH 4-8, die laut dem Mann-Whitney-U-Test signifikante Gruppenunterschiede je angewendeter Rechenstrategie hervorbrachten.

DD = Dyskalkuliker; KG = Kontrollgruppe; U = Mann-Whitney-U-Wert;

p_{Bonf} = Signifikanzwert nach Bonferroni-Korrektur; r = Effektstärke nach Cohen.

Tabelle 5

Häufigkeit der signifikanten Aufgaben hinsichtlich der angewendeten Rechenstrategie je Aufgabenart, Inhaltsbereich und Anforderungsniveau

| | | | | | | | |
|----|----------|-------------|----------|------------|-----------|----------------|----------|
| AA | Addition | Subtraktion | Ergänzen | Verdoppeln | Halbieren | Multiplikation | Division |
| | 2 (5) | 3 (5) | 4 (5) | 1 (2) | 3 (3) | 3 (5) | 4 (5) |
| | 40% | 60% | 80% | 50% | 100% | 60% | 80% |
| IB | IB 1 | IB 4 | IB 3 | IB 5 | | | |
| | 9 (13) | 2 (6) | 0 (3) | 4 (6) | | | |
| | 69.23% | 66.67% | 0% | 66.67% | | | |
| AN | AN I | AN II | AN III | | | | |
| | 15 (22) | 3 (3) | 1 (5) | | | | |
| | 68.18% | 100% | 20% | | | | |

Anmerkungen. Beschrieben werden die absoluten und relativen Häufigkeiten der signifikanten Aufgaben, in denen eine effiziente Rechenstrategie angewendet werden konnte und die zwischen den Gruppen unterschieden haben. Die Häufigkeiten werden im Vergleich zur Gesamtmenge der jeweiligen Aufgaben dargestellt. Diese wurden je Aufgabenart, Inhaltsbereich und Anforderungsniveau berechnet. AA = Aufgabenart; IB = Inhaltsbereich; AN = Anforderungsniveau.

Intelligenz. Die Berechnung der MANOVA, zur Einschätzung des Einflusses des IQ auf die basisnumerische Leistung, zeigt einen signifikanten Unterschied zwischen IQ und Leistung im BM 4-8 ($F(48, 31) = 2.13, p = .014, \eta^2_p = .768$, Wilks $\Lambda = .232$) einerseits sowie zwischen der Gruppenzugehörigkeit (DD vs. KG) und der Leistung im BM 4-8 ($F(48, 31) = 4.19, p < .001, \eta^2_p = .867$, Wilks $\Lambda = .133$) andererseits. Das bedeutet, dass der IQ zwar einen signifikanten Einfluss auf die erreichten Werte im BM 4-8 ausübt, der signifikante Unterschied der Aufgabenlösung zwischen den DD und der KG jedoch bestehen bleibt, wenn für den IQ kontrolliert wird.

Geschlecht. Aufgrund der häufig diskutierten Frage, inwiefern Unterschiede der Leistung in der Mathematik auf den Einfluss des Geschlechtes zurückzuführen sein könnten, wurde ein Mann-Whitney-U-Test durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass das Geschlecht keinen signifikanten Unterschied hinsichtlich der Gesamtleistung im BM 4-8 hervorbrachte, Jungen ($Mdn = 13.57$) und Mädchen ($Mdn = 23.64$) also vergleichbare Leistungen zeigten (Mann-Whitney-U-Test: $U = 67.00, p = .052$). Jedoch fällt der Signifikanzwert knapp nicht signifikant aus. Man könnte also von einem Trend in Richtung unterschiedlicher Leistung bei Jungen und Mädchen sprechen, wobei die Mädchen über einen höheren Median verfügen.

Zusammenhänge.

Mathematikangst. Um einen Hinweis darauf zu bekommen, inwiefern die Mathematikangst mit der Gesamtleistung im BM 4-8 zusammenhängt, wurde eine Rangkorrelation nach Spearman gerechnet. Die Rangkorrelation zeigt, dass bei den DD ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen der Gesamtleistung im BM 4-8 und der Mathematikangst resultiert ($r_s = .387, p = .042, n = 28$). Hierbei handelt es sich um einen mittleren Effekt. Bei der KG hingegen fällt der Zusammenhang signifikant negativ aus, ($r_s = -.713, p = .009, n = 12$). Dies entspricht einem starken Effekt. Bei den DD resultiert folglich die Mathematikangst umso grösser, je besser die Gesamtleistung ist, während bei der KG die Mathematikangst umso tiefer ausfällt, je höher die Gesamtleistung ist. Ein Vergleich der beiden Korrelationskoeffizienten zeigt, dass diese sich signifikant voneinander unterscheiden ($z = 3.35, p = .001$).

Domänenübergreifende kognitive Fähigkeiten. Auch die Fragen nach den Zusammenhängen mit den domänenübergreifenden kognitiven Fähigkeiten wurden anhand einer Rangkorrelation nach Spearman analysiert. Für den Zusammenhang zwischen der Gesamtleistung im BM 4-8 und dem IQ resultiert bei den DD ein signifikant positiver Zusammenhang ($r_s = .475, p = .001, n = 42$), was einem mittleren bis starken Effekt entspricht, während bei der KG kein Zusammenhang beobachtet wird ($r_s = .063, p = .690, n = 43$). Das bedeutet, dass die Gesamtleistung bei den DD umso höher ausfällt, je höher deren IQ ist.

Der Zusammenhang zwischen der Gesamtleistung im BM 4-8 und der visuell-räumlichen Merkspanne zeigt weder bei den DD ($r_s = .325, p = .141, n = 22$) noch bei der KG ($r_s = .504, p = -.306, n = 7$) einen signifikanten Zusammenhang.

Die Prüfung des Zusammenhangs zwischen der Gesamtleistung im BM 4-8 und der Aufmerksamkeit wurde mit den Tests Alertness und Go/Nogo vorgenommen. Dabei resultiert der Zusammenhang der Mathematikleistung mit der Alertness weder für die DD ($r_s = -.257, p = .105, n = 41$) noch für die KG ($r_s = -.013, p = .925, n = 23$) signifikant. Hingegen kann ein signifikant negativer Zusammenhang zwischen der Gesamtleistung im BM 4-8 und der Fehlerzahl im Go/Nogo-Test bei den DD aufgezeigt werden ($r_s = -.374, p = .016, n = 41$), welcher sich bei der KG nicht zeigte ($r_s = -.241, p = .256, n = 24$). Das bedeutet, dass umso weniger Fehler im Go/Nogo-Test gemacht werden, je besser die Mathematikleistung bei den DD ausfällt.

Klassenstufe. Um eine Aussage darüber machen zu können, inwiefern im Entwicklungsverlauf von Personen mit und ohne Dyskalkulie eine Veränderung der basisnumerischen Fertigkeiten stattfindet, wurde der Zusammenhang der Gesamtleistung im BM 4-8 und der Klassenstufe untersucht. Dabei wird ersichtlich, dass bei den DD ein signifikant positiver Zusammenhang besteht ($r_s = -.384, p = .012, n = 42$), was einem mittleren Effekt entspricht, während bei der KG kein signifikanter Zusammenhang resultiert ($r_s = .098, p = .533, n = 43$). Diese Ergebnisse zeigen, dass bei den DD eine bessere Gesamtleistung resultiert, je höher die Klassenstufe ist.

Itemanalyse und Reliabilitätsanalyse. Auf Itemebene wurde eine Itemanalyse durchgeführt, um das Lösungsverhalten je Aufgabe zu untersuchen. Dabei wurde für jede Gruppe die Schwierigkeit je Aufgabe berechnet. Die Ergebnisse sind in Anhang B aufgeführt und wurden innerhalb der deskriptiven Statistik bereits beschrieben (höhere Lösungswahrscheinlichkeit aller Aufgaben bei der KG).

Anhand der Reliabilitätsanalyse wurden das Cronbachs alpha und die Trennschärfe aller Aufgaben ermittelt. Die interne Konsistenz zeigt sich mit einem $\alpha = .946$ als sehr hoch, was für die innere Konsistenz des Tests spricht. Die berechneten Trennschärfen reichen von $r_{it} = .20$ bis $r_{it} = .71$ und sind in Anhang B eingetragen. Dabei wird ersichtlich, dass nur zwei Aufgaben einen Wert von $r_{it} < .30$ aufweisen und sich damit als ungenügend trennscharf erweisen, während 40 Items gute Trennschärfen aufweisen ($r_{it} > .40$). 12 Aufgaben weisen gar eine $r_{it} > .60$ auf. Bei genauerer Betrachtung, welche Vpn zu den Richtig- respektive Falschlösern gehören, zeigt sich, dass bis auf die Aufgaben 6e (Division: $24 : 6$) und 8d (Dezimalsystem grosse Zahlen: $10\,000 - 10$) mit wenigen Ausnahmen die KG die Aufgaben richtig lösten und die DD falsch. Diese 12 Aufgaben, die sehr gut zwischen Lösern und Nicht-Lösern unterschieden haben, wurden schliesslich mit allen Aufgaben, welche im Mann-Whitney-U-Test signifikant zwischen den Gruppen ausfielen, verglichen. Zehn dieser 12 Aufgaben wiesen eine $r_{it} > .60$ auf und fielen beim Mann-Whitney-U-Test signifikant aus. Diese 10 Aufgaben sind in Tabelle 6 aufgelistet und zeigen sich ziemlich heterogen hinsichtlich der Aufgabenart (Addition, Subtraktion, Ergänzen, Halbieren, Division, Dezimalsystem mit grossen Zahlen und Textaufgaben), der Inhaltsbereiche (wobei die meisten Aufgaben dem Inhaltsbereich 1 angehören) und der Anforderungsniveaus (grösstenteils Niveau I).

Tabelle 6

Signifikante Aufgaben des BASIS-MATH 4-8 mit Trennschärfen > .60

| Nr. | Aufgabe | AA | IB | AN | r_{it} | U (r) |
|-----|--|--------------------------------|----|----|----------|--------------|
| 1b | 57 + 6 | Addition | 1 | 1 | .62 | 648.50 (.38) |
| 1c | 47 + 36 | Addition | 1 | 1 | .61 | 540.50 (.49) |
| 2c | 430 - 70 | Subtraktion | 1 | 1 | .66 | 562.00 (.47) |
| 3b | 90 - ... = 83 | Ergänzen | 1 | 1 | .68 | 666.50 (.40) |
| 3d | 1000 - ... = 670 | Ergänzen | 1 | 1 | .71 | 562.00 (.47) |
| 4e | 108 : 2 | Halbieren | 5 | 2 | .66 | 626.00 (.41) |
| 6c | 160 : 4 | Division | 2 | 1 | .64 | 688.00 (.38) |
| 6e | 1000 : 8 | Division | - | 3 | .61 | 334.00 (.59) |
| 8d | 10 000 - 10 | Dezimalsystem grosse Zahlen | 7 | 1 | .61 | 559.90 (.43) |
| 9c | Drei Stück Käsekuchen kosten 7.20 Fr. Wie viel kostet ein Stück? | Textaufgaben | 6 | 2 | .63 | 573.50 (.38) |

Anmerkungen. Beschrieben werden jene Aufgaben, welche laut Mann-Whitney-U-Test signifikant unterschiedlich zwischen den Gruppen gelöst wurden und zudem eine Trennschärfe grösser als .60 aufwiesen.

Nr. = Aufgabennummer; AA = Aufgabenart; IB = Inhaltsbereich; AN = Anforderungsniveau; r_{it} = korrigierte Trennschärfe; U = Mann-Whitney-U-Wert; r = Effektstärke nach Cohen.

Explorative Faktorenanalyse. Um zu erkennen, inwiefern sich die Aufgaben des BM 4-8 aufgrund des Lösungsverhaltens der DD zu Faktoren zusammenschliessen lassen, wurde eine explorative Faktorenanalyse aller Aufgaben durchgeführt. Sowohl der Bartlett-Test ($\text{Chi-Quadrat}(1128) = 2681.71, p < .001$) als auch der KMO-Wert ($\text{KMO} = .808$) weisen darauf hin, dass sich die Variablen für eine Faktorenanalyse eignen. Aufgrund der Annahme möglicher Korrelationen zwischen den Items wurde eine Hauptkomponentenanalyse mit Oblimin-Rotation durchgeführt. Diese weist auf das Vorliegen von 16 Faktoren mit Eigenwerten grösser als 1.0 hin (Anhang C). Der Eigenwert eines Faktors gibt an, wieviel der Gesamtvarianz aller Variablen durch diesen Faktor erklärt werden. Obwohl im Screeplot (Abbildung 13) ersichtlich wird, dass die Abstufungen nach dem Knick der ersten beiden Faktoren nicht mehr sehr gross ausfallen, wurde die 16-Faktor-Lösung nach dem Eigenwertkriterium gewählt, um der Vielfalt der Aufgaben gerechter zu werden. Die resultierende 16-Faktor-Lösung erklärt insgesamt 83.1 % der Varianz (Tabelle 7). In Anhang C sind die Faktorladungen sowie die Zuordnung der Variablen zu den Faktoren in der rotierten Komponentenmatrix ersichtlich. Einige Querladungen (gelb markiert) sind vorhanden. Insgesamt konnten 28 der 48 Aufgaben den 16 Faktoren eindeutig zugeordnet werden. In Tabelle 7 sind die Faktoren hinsichtlich der Aufgabeninhalte, Aufgabenart, Inhaltsbereiche und Anforderungsniveaus beschrieben. Dabei fällt auf, dass die Faktoren mehrheitlich heterogen zusammengesetzt sind. Die Faktoren 2, 9 und 16 zeigen keine klaren

Gemeinsamkeiten auf. Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass die Faktoren 3 und 4 Aufgaben zum Dezimalsystem zusammenfassen, Faktor 6 Zählaufgaben, Faktor 7 Aufgaben zum Inhaltsbereich Mathematisieren und Textaufgaben, Faktor 8 enthält einen Teil der Ergänzungsaufgaben, Faktor 12 entspricht dem Inhaltsbereich Grundoperationen mit grossen Zahlen und Übergängen, Faktor 1 dem Inhaltsbereich 1 (Addieren, Subtrahieren, Ergänzen, Verdoppeln mit einfachen Zahlen) und Faktor 15 dem Inhaltsbereich 2 (Multiplizieren und Dividieren mit einfachen Zahlen). Faktor 1 und 14 zeichnen sich dadurch aus, dass eher Aufgaben mit höherem Anforderungsniveau betroffen sind, während die Faktoren 5, 10 und 11 gänzlich das tiefste Anforderungsniveau aufweisen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Faktoren, die beschreiben sollen, welches Lösungsverhalten DD bei den Aufgaben aus dem BM 4-8 aufweisen, kein einheitliches Muster aufzeigen. Jedoch können die meisten der Faktoren einer der beschreibenden Variablen (Aufgabeninhalte, Aufgabenart, Inhaltsbereiche und Anforderungsniveaus) zugeordnet werden.

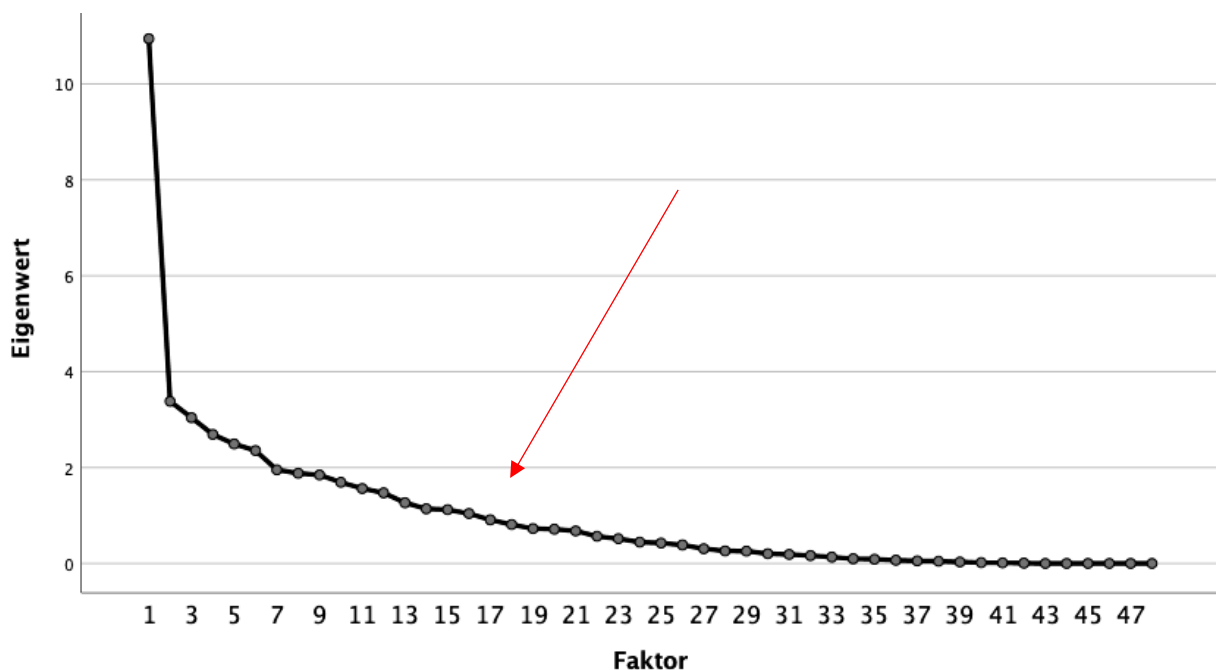


Abbildung 13. Screeplot der explorativen Faktorenanalyse. Ersichtlich wird, dass der grösste Knick im Screeplot nach dem zweiten Faktor ausfällt. Gewählt wurden schliesslich 16 Faktoren.

Tabelle 7

Faktoren mit Zuordnung der anfänglichen Eigenwerte, der kumulierten Varianz und der Aufgaben je Faktoren

| Faktor | Eigenwert | Varianz | Nr. | Aufgaben | AA | IB | AN |
|--------|-----------|---------|-----|--|---------------------------------|------|-----|
| 1 | 10.942 | 22.8 | 5c | 30 * 40 | Multiplikation | 5 | II |
| | | | 9b | Thomas hat eine CD-Sammlung. Er gibt Laura 6 CDs. Nun bleiben ihm 37 CDs. Wie viele CDs hatte Thomas am Anfang in seiner Sammlung? | Textaufgaben | 6 | III |
| | | | 9c | Drei Stück Käsekuchen kosten 7.20 Fr. Wie viel kostet ein Stück Käsekuchen? | Textaufgaben | 6 | II |
| 2 | 3.381 | 29.8 | 2e | 475 - 176 | Subtraktion | - | III |
| | | | 5a | 7 * 6 | Multiplikation | 2 | I |
| | | | 5f | 3 * 5 = 15 | Multiplikation Rechengeschichte | 6 | II |
| 3 | 3.041 | 36.2 | 8d | 10 000 - 10 | Dezimalsystem grosse Zahlen | 7 | I |
| | | | 8e | 100 000 - 100 | Dezimalsystem grosse Zahlen | 7 | III |
| | | | 8f | 100 000 - 1000 | Dezimalsystem grosse Zahlen | 7 | III |
| 4 | 2.691 | 41.8 | 8a | Wie viele Zehnerbündel kannst du mit den 57 schwarzen Punkten machen? | Dezimalsystem Bündeln | 7 | I |
| | | | 8g | Zu welchem Strich gehört die Zahl 86? | Dezimalsystem (Zahlenstrahl) | - | II |
| 5 | 2.492 | 47.0 | 4a | 2 * 17 | Verdoppeln | 1 | I |
| | | | 8b | Wie viele Zehnerbündel kannst du mit den 124 schwarzen Punkten machen? | Dezimalsystem Bündeln | 7 | I |
| 6 | 2.354 | 51.9 | 7a | 2er Schritte vorwärts von 185 an (bis 209) | Zählen | 4 | II |
| | | | 7b | 10er Schritte rückwärts von 137 an (bis 67) | Zählen | 4 | I |
| | | | 7c | 100er Schritte vorwärts von 662 an (bis 1462) | Zählen | 4 | I |
| 7 | 1.952 | 55.9 | 6f | 20 : 4 = 5 | Division Rechengeschichte | 6 | II |
| | | | 9a | Peter hat 42 CDs. Er gibt 15 CDs seiner Freundin Anne. Wie viele CDs hat er noch? | Textaufgaben | 3, 6 | I |
| 8 | 1.879 | 59.9 | 1e | 849 + 265 | Addition | 5 | III |
| | | | 3b | 90 - ... = 83 | Ergänzen | 1, 3 | I |
| | | | 3c | 90 - ... = 83 | Ergänzen | 1, 3 | I |
| | | | 3e | 3600 - ... = 3593 | Ergänzen | 1 | I |
| 9 | 1.846 | 63.7 | 1c | 47 + 36 | Addition | 1 | I |
| | | | 8i | Notation in Stellentafel: 7 Tausender, 3 Zehner, 15 Einer (Wie heisst die Zahl, die entsteht?) | Dezimalsystem Stellentafel | 7 | III |
| 10 | 1.692 | 67.2 | 2a | 690 - 50 | Subtraktion | 1 | I |
| | | | 3d | 1000 - ... = 670 | Ergänzen | 1, 3 | I |
| | | | 6b | 12 : 4 | Division | 2 | I |
| | | | 8c | 10 000 - 1 | Dezimalsystem grosse Zahlen | 7 | I |
| 11 | 1.563 | 70.5 | 1a | 143 + 50 | Addition | 1 | I |
| | | | 4b | 2 * 107 | Verdoppeln | 1 | I |
| | | | 6d | 160 : 40 | Division | 2, 5 | I |
| 12 | 1.473 | 73.6 | 4c | 18 : 2 | Halbieren | - | I |
| | | | 4d | 180 : 2 | Halbieren | - | I |
| | | | 4e | 108 : 2 | Halbieren | 5 | II |
| | | | 5d | 10 * 256 | Multiplikation | 5 | I |
| | | | 5e | 150 * 20 | Multiplikation | 5 | II |
| 13 | 1.266 | 76.2 | 1b | 57 + 6 | Addition | 1 | I |
| | | | 2b | 53 - 7 | Subtraktion | 1 | I |
| | | | 2c | 430 - 70 | Subtraktion | 1 | I |
| 14 | 1.139 | 78.6 | 1d | 199 + 198 | Addition | - | III |
| | | | 2d | 701 - 698 | Subtraktion | 5 | III |
| | | | 8j | Notation in Stellentafel: 2 Tausender, 1 Hunderter, 35 Zehner, 4 Einer (Wie heisst die Zahl, die entsteht?) | Dezimalsystem Stellentafel | 7 | III |
| 15 | 1.122 | 80.9 | 5b | 8 * 9 | Multiplikation | 2 | I |
| | | | 6a | 24 : 6 | Division | 2 | I |
| | | | 6c | 160 : 4 | Division | 2 | I |
| | | | 8h | Zu welchem Strich gehört die Zahl 473? | Dezimalsystem (Zahlenstrahl) | - | II |
| 16 | 1.042 | 83.1 | 3a | 73 + ... = 100 | Ergänzen | 1 | I |
| | | | 6e | 1000 : 8 | Division | - | III |

Anmerkungen. Beschrieben werden die Faktoren hinsichtlich Eigenwert, Varianzaufklärung (in %), Aufgabenzuordnungen, zugehöriger Aufgabenart, zugehöriger Anforderungsniveaus und zugehöriger Inhaltsbereiche. Die Eigenwerte beschreiben die anfänglichen Eigenwerte, die Varianz die kumulierte Varianz.

Nr. = Aufgabennummer; Aufgaben = Aufgabeninhalte; AA = Aufgabenart; IB = Inhaltsbereich; AN = Anforderungsniveau.

Hierarchische Clusteranalyse. Um explorativ zu erforschen, welche Gemeinsamkeiten Personen mit einem ähnlichen Lösungsverhalten teilen respektive ob mögliche Subgruppen der DD identifiziert werden können, wurde eine Hierarchische Clusteranalyse der Dyskalkulie-Gruppe durchgeführt. Anhand des Dendrogramms (Abbildung 14) hätte eine Zwei-Cluster-Lösung gewählt werden sollen. Weil jedoch die Vpn hinsichtlich vieler verschiedener Eigenschaften betrachtet werden sollten, was auf Subgruppen schliessen lassen könnte, wurde schliesslich eine Vier-Custer-Lösung gewählt. Die vier Cluster, anhand derer die Vpn nach ihrem Lösungsverhalten der Aufgaben aus dem BM 4-8 eingeteilt wurden (Methode: entferntester Nachbar, euklidische Distanz), sind in Tabelle 8 ersichtlich. Die Cluster werden folgend kurz beschrieben.

Cluster 1 ist mit 30 Vpn gross, enthält verhältnismässig wenige Jungen und ist zusammengesetzt aus etwas älteren Vpn aus gemischten Klassen, wobei ein grosser Teil der Gymnasiasten enthalten ist. Ihre Gesamtpunktezahl ist im Vergleich zum Durchschnitt der DD hoch, aber tiefer als jener der KG, und die Rechenstrategien entsprechen ungefähr dem Durchschnitt der DD, jedoch mit breiter Streuung. Im Vergleich zur KG bestehen Schwierigkeiten in den Aufgabenarten Rechengeschichte, Textaufgaben und Zählen sowie in den Inhaltsbereichen Zählen und Textaufgaben. Ausserdem resultieren Aufgaben des Anforderungsniveaus II am schlechtesten. Ihr IQ ist im Vergleich zur Gesamtgruppe der DD eher hoch (aber tiefer als bei der KG), die Alertness resultiert etwas tiefer, jedoch ist ihre Inhibitionsfähigkeit besser (weniger Fehler im Go/Nogo-Test), die visuell-räumliche Merkspanne entspricht dem Durchschnitt der DD, ist aber tiefer als bei der KG, und die Mathematikangst zeigt sich etwas stärker als beim Durchschnitt der DD und deutlich höher als bei der KG.

Cluster 2 enthält fünf Vpn, davon verhältnismässig viele Jungen, und betrifft gemischte Klassen, wobei vermehrt Vpn aus der Primarschule und der Berufsschule enthalten sind. Die Gesamtpunktezahl zeigt sich tief und auch Rechenstrategien können nicht sehr effizient angewendet werden. Schwierigkeiten resultieren bei den Aufgabenarten Subtraktion, Ergänzen, Multiplikation und Division, in den Inhaltsbereichen sind vor allem Grundoperationen mit grossen Zahlen und Übergängen und Multiplizieren und Dividieren mit einfachen Zahlen betroffen, aber auch einfache Zahlen addieren, subtrahieren, ergänzen und verdoppeln und Beziehung Teil-Ganzes. Dabei werden Aufgaben des Anforderungsniveaus III am schlechtesten gelöst. Ihr IQ fällt im Vergleich zur KG und Dyskalkulie-Gesamtgruppe eher tief aus, jedoch zeigen sich die Leistungen der Alertness und

visuellen Merkspanne als relativ gut. Ihre Mathematikangst fällt auffallend gering aus.

In Cluster 3 sind sechs Vpn eingeschlossen, dabei im Vergleich zur Gesamtstichprobe etwas mehr Jungen, die zwischen der sechsten und neunten Klasse relativ eng eingestuft werden können und vor allem der Sekundarstufe 1 angehören. Ihre Gesamtpunktezahl liegt etwas tiefer als der Durchschnitt der DD, und ihre Fähigkeit, Rechenstrategien anwenden zu können, entspricht ungefähr dem Durchschnitt der DD. Schwierigkeiten bereiten ihnen die Aufgabenarten Halbieren und Textaufgaben, aber auch Dezimalsystemaufgaben sind betroffen, ausserdem fällt die Leistung des Inhaltsbereichs Grundoperationen mit grossen Zahlen und Übergängen tief aus. Wie erwartet bereiten ihnen die Aufgaben aus dem Anforderungsniveau I, gefolgt von II und zum Schluss von III im Vergleich zur KG am meisten Probleme. Ihr IQ ist im Vergleich zur KG und Dyskalkulie-Gesamtgruppe tiefer und ihre Alertness- und Inhibitionsleistung schlechter. Die Mathematikangst ist tiefer als beim Durchschnitt der DD, aber höher als bei der KG.

Cluster 4 umfasst nur noch zwei weibliche Vpn aus der sechsten und 10. Klasse, deren Gesamtpunktezahl sehr tief ausfällt. Eine Person kann kaum Rechenstrategien anwenden, der anderen gelingt das etwas besser. Ihnen scheinen alle Aufgabenarten und Inhaltsbereiche grundsätzlich sehr schwerzufallen, auffallend schlecht sind jedoch die Leistungen hinsichtlich Zählen (gar keine Punkte) sowie Ergänzen und Halbieren. Bei den Inhaltsbereichen scheinen Textaufgaben etwas besser gelöst zu werden als die restlichen Bereiche. Folglich waren Aufgaben aller Anforderungsniveaus von schlechter Leistung betroffen, jedoch bereitete das Niveau III die grössten Schwierigkeiten. Ihr IQ fiel im Vergleich zur Gesamtstichprobe sehr tief aus, hingegen die Alertness-Leistung höher. Eine Person wies einen hohen Wert in Mathematikangst auf, die andere Person einen tiefen Wert.

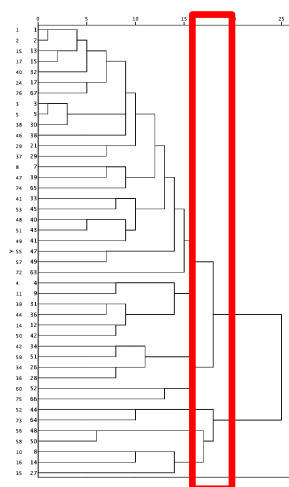


Abbildung 14. Dendrogramm der Hierarchischen Clusteranalyse. Das Dendrogramm zeigt eine Zwei-Cluster-Lösung auf. Gewählt wurde schliesslich eine 4-Custer-Lösung.

Tabelle 8

Beschreibung der Cluster der hierarchischen Clusteranalyse

| | Cluster 1 | Cluster 2 | Cluster 3 | Cluster 4 | KG | DD |
|------------------------|---------------------------|--|--|-------------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| <i>n</i> (w, m) | 30 (27, 3) | 5 (2, 3) | 6 (5, 1) | 2 (2, 0) | 43 (32, 11) | 43 (36, 7) |
| Alter <i>M</i> (Range) | 15.64 (12.5-19.6) | 15.36 (12.6-19.5) | 14.45 (12.2-16.3) | 15.75 (13.0-18.5) | 13.86 (11.6-18.1) | 15.45 (12.2-19.6) |
| Klassenstufe | 6.-13. Klasse | 4.-12. Klasse | 6.-9. Klasse | 6. und 10. Klasse | Klasse: 5.-12. Klasse | 4.-13. Klasse |
| Schulbereich | Primar: 3 | Primar: 3 | Primar: 1 | Primar: 1 | Primar: 9 | Primar: 8 |
| | Sekstufe 1: 12 | Sekstufe 1: 0 | Sekstufe 1: 3 | Sekstufe 1: 1 | Sekstufe 1: 18 | Sekstufe 1: 16 |
| | Sekstufe 2 - | Sekstufe 2 - Berufsschule: 2 | Sekstufe 2 - Berufsschule: 0 | Sekstufe 2 - Berufsschule: 0 | Sekstufe 2 - | Sekstufe 2 - |
| | Berufsschule: 2 | Sekstufe 2 - Gymnasium: 0 | Sekstufe 2 - Gymnasium: 0 | 0 | Berufsschule: 0 | Berufsschule: 4 |
| | Sekstufe 2 - Gymnasium: 8 | | unbekannt: 2 | Sekstufe 2 - Gymnasium: 0 | Sekstufe 2 - | Sekstufe 2 - Gymnasium: 8 |
| GP <i>M</i> (Range) | 61.37 (49-73) | 29.20 (16-48) | 48.33 (37-58) | 21 (12-30) | Gymnasium: 7 | 53.93 |
| GZP <i>M</i> (Range) | 81.64 (16.67-100) | 35.62 (0-61.54) | 79.93 (70.37-100) | 29.76 (9.52-50) | 75.44 | 73.63 |
| AA | Rechengeschichte | Subtraktion | Halbieren | Zählen | 90.64 | |
| | Textaufgabe | Ergänzen | Textaufgaben | Ergänzen | | |
| | Zählen | Multiplikation | (Dezimalsystem) | Halbieren | | |
| | | Division | | (Multiplikation) | | |
| | | | | (Verdoppeln) | | |
| | | | | (Division) | | |
| | | | | (Dezimalsystem) | | |
| IB | Zählen | Grundoperationen mit grossen Zahlen und Übergängen | Grundoperationen mit grossen Zahlen und Übergängen | Besonders: Zählen | | |
| | Textaufgaben | Multiplizieren und Dividieren mit einfachen Zahlen | | Dezimalsystem | | |
| | | (einfache Zahlen Addieren und Subtrahieren) | | -> alle Bereiche deutlich betroffen | | |
| | | (Ergänzen und Verdoppeln) | | | | |
| AN | Niveau II | Niveau III | Niveau I (Niveau II Niveau III) | Niveau III (Niveau II und I) | | |
| IQ | 54.53 | 35.28 | 42.30 | 18.31 | 69.81 | 48.62 |
| Alertness | 39.86 | 48.60 | 44.17 | 55.50 | 47.37 | 45.74 |
| Inhibition | 3.93 | 5.60 | 6.67 | 5.00 | 4.54 | 4.59 |
| Arbeitsgedächtnis | 5.5 | 5.67 | 5.00 | 5.5 | 6.21 | 5.48 |
| Mathematikangst | 35.04 | 19.33 | 26.75 | 46 | 14.08 | 34.18 |

Anmerkungen. Zu sehen sind die Beschreibungen der Cluster der Ergebnisse der hierarchischen Clusteranalyse. Diese wurde anhand verschiedener Faktoren vorgenommen, die auf der linken Seite ersichtlich sind. Das Alter ist in Jahren angegeben und zeigt zusätzlich die jüngste und älteste Person auf. Die Klassenstufe beschreibt die tiefste und die höchste Klassenstufe des Clusters. Der Schulbereich zeigt die Häufigkeit der Personen, welche die Primarschule, Sekundarstufe I oder Sekundarstufe II (Berufsschule oder Gymnasium) besuchen. Personen, die nicht eingeteilt werden können, sind als unbekannt eingetragen. Beschrieben werden die Clusters hinsichtlich herausragenden Schwierigkeiten bezüglich Aufgabenart, Inhaltsbereichen und Anforderungsniveaus. Begriffe in Klammern bedeuten, dass diese auch als auffällig eingestuft werden können, aber nicht primär. Der IQ und die Alertness wurden anhand des gemittelten Prozentrangs der Gruppe angegeben. Die Inhibition besteht aus der gemittelten Anzahl Fehler im Go/Nogo-Test. Die visuell-räumliche Merkspanne wird anhand des Mittelwertes des Basisscores und der Blockspanne des Corsi-Block-Tapping-Tests für die Gruppe angegeben. Die Mathematikangst zeigt den Mittelwert der erreichten summierten Werte aus dem MAI an. In der äussersten Spalte sind als Vergleich die Angaben für die gesamte Kontrollgruppe und die gesamte Dyskalkulie-Gruppe angegeben.

n = Anzahl Versuchspersonen; w = weiblich; m = männlich; *M* = Mittelwert; *Range* = Spanne des kleinsten bis grössten Wertes der Gruppe; *GP* = erreichte gemittelte Gesamtpunktzahl des Clusters; *GZP* = erreichte gesamte Zusatzpunktzahl relativ des Clusters; *AA* = Aufgabenart; *IB* = Inhaltsbereich; *AN* = Anforderungsniveau; *IQ* = Intelligenzquotient.

Diskussion

In der vorliegenden Studie wurde untersucht, inwiefern sich das Lösungsverhalten in Bezug auf basisnumerische Aufgaben bei Kindern und Jugendlichen mit und ohne Dyskalkulie unterscheidet und ob Aufgaben vorliegen, die besonders gut zwischen den Gruppen unterscheiden. Ebenso wurden verschiedene Einflussfaktoren in die Analyse eingeschlossen. Die Ergebnisse werden folgend diskutiert und die Fragestellungen beantwortet.

Basisnumerische Fertigkeiten. Dass der Gesamtwert des BM 4-8 zwischen den Gruppen signifikant unterschiedlich ausfiel, überraschte kaum, wurden die Vpn doch grösstenteils anhand dieses Wertes den beiden Gruppen zugeteilt. Dabei wurde ersichtlich, dass die Werte der DD im Vergleich zur KG deutlich tiefer ausfallen und breiter streuen sowie auch ältere und gut gebildete Vpn betroffen sind. Die KG weist allgemein hohe Werte und wenig Streuung auf, was auf Deckeneffekte hinweist. Für Kinder ohne Dyskalkulie sind basisnumerische Aufgaben also leicht zu lösen. Signifikante Unterschiede im Lösungsverhalten zwischen DD und KG resultierten für viele der Aufgaben. Aufgefallen ist jedoch, dass dies gehäuft Subtraktionen, Ergänzungen und Divisionen betrifft. Typischerweise schwierig waren Grundoperationen mit grossen Zahlen und Übergängen, aber auch einfachere Rechnungen aller Grundoperationen. Hier zeigt sich wohl ein wesentlicher Unterschied zur KG, welche Rechnungen mit tiefem Anforderungsniveau problemlos lösen kann. Diese Tatsache dürfte erklären, warum die Unterschiede gerade für das Anforderungsniveau I so deutlich ausfielen. Im Hinblick auf die angewendeten Rechenstrategien zeigte sich ein ähnliches Bild. Diese konnten gerade bei Aufgaben hinsichtlich Halbieren, Divisionen und Ergänzen schlecht angewendet werden. Interessanterweise waren vor allem Aufgaben aus dem Anforderungsniveau II und am wenigsten solche aus dem Niveau III betroffen. Dies könnte damit erklärt werden, dass Aufgaben des Niveaus I auch von DD mit effizienten Strategien teilweise noch gelöst werden können, während bei deutlich schwierigeren Aufgaben aus Niveau III vermehrt auch von der KG ungünstigere Rechenstrategien angewendet werden, was den Unterschied zwischen den Gruppen verringert. Zudem dürften gerade Kinder mit Dyskalkulie, die ein höheres Bildungsniveau aufweisen, günstige Strategien erworben haben, ohne die ein Eintritt in eine höhere Ausbildung kaum möglich geworden wäre. Damit sind es Aufgaben des Aufgabenniveaus II, welche am besten zwischen den Kindern mit und ohne Dyskalkulie unterschieden haben.

Mit der Itemanalyse wurden 10 Aufgaben anhand ihrer Trennschärfen und der signifikanten Unterschiede des Lösungsverhaltens zwischen den Gruppen identifiziert, welche besonders geeignet scheinen, die basisnumerischen Fertigkeiten zu prüfen und möglicherweise als Screening-Verfahren für einen ersten Eindruck eingesetzt werden könnten. Die Aufgaben zeigten sich heterogen, jedoch bestätigt sich auch hier, dass sich Grundoperationen mit einfachen Rechenaufgaben zur Testung als sinnvoll erweisen. Kinder mit Dyskalkulie dürften bereits bei diesen einfachen Rechnungen Fehler unterlaufen. Auch die Faktorenanalyse belegt, dass das Lösungsverhalten der DD heterogen ausfällt. Diese Heterogenität zieht sich als roter Faden durch die Ergebnisse und es scheint, dass jedem DD andere Mathematikaufgaben Schwierigkeiten bereiten und Fehler in verschiedenen basisnumerischen Aufgaben individuell gemacht werden. Ein ähnliches Bild zeichnet die Metaanalyse von Haberstroh und Schulte-Körne (2019), die zwar nicht einzelne Aufgaben, jedoch verschiedene Studien hinsichtlich Diagnose- und Behandlungsmöglichkeiten analysiert haben. DD zeigen Schwierigkeiten in allen Mathematikbereichen, insbesondere jedoch bei den basisnumerischen Aufgaben. Dieser Tatsache sollte in einer differenzierten Diagnostik und Förderung unbedingt Rechnung getragen werden, um dem einzelnen Individuum eine Leistungsverbesserung zu ermöglichen.

Ob dabei Geschlechterunterschiede eine Rolle spielen, ist laut aktuellem Forschungsstand noch nicht endgültig geklärt. In der vorliegenden Untersuchung konnte kein signifikanter Unterschied in der Mathematikleistung zwischen Mädchen und Jungen aufgezeigt werden, was mit vielen Forschungen übereinstimmt (Landerl, Vogel et al., 2017). Jedoch kann von einem Trend gesprochen werden, wobei Mädchen eine etwas bessere Leistung erbrachten als Jungen, was wiederum Niklas und Schneider (2012) widerspricht. Möglicherweise nimmt das Geschlecht Einfluss auf den Zeitpunkt der Diagnosestellung, da Jungen eher externalisierende Symptome zeigen (Card, Stucky, Sawalani & Little, 2008) und daher früher diagnostiziert werden. Träfe diese Annahme zu, wäre mit mehr Jungen in der Stichprobe möglicherweise ein signifikanter Effekt entstanden.

Einflussfaktoren. Der IQ ist ein Faktor, der in Zusammenhang mit Dyskalkulien immer wieder genannt wird und als Ausschlusskriterium der Diagnosestellung gilt, wenn der $IQ < 70$ (S3-Leitlinien) respektive < 85 (ICD-10) ausfällt. Auch in der Studie wiesen die DD einen signifikant tieferen IQ im Vergleich zur KG auf, was Einfluss auf die Aufgabenlösung nehmen könnte. Jedoch blieben die untersuchten Unterschiede der Aufgabenlösungen zwischen den Gruppen bestehen, wenn für die IQ-Variable kontrolliert wurde. Trotzdem

scheint sich erneut zu bestätigen, dass die Mathematikleistung mit dem IQ in Zusammenhang zu stehen scheint. Ersichtlich wird diese Tatsache darin, dass bei DD ein höherer IQ mit besseren basisnumerischen Leistungen einherging. Bei der KG könnte solch ein Zusammenhang aufgrund der beobachteten Deckeneffekte gar nicht aufgezeigt werden, weil die Aufgaben für Kinder ohne Dyskalkulie, unabhängig von ihrem IQ, problemlos lösbar sind und das Kriterium basisnumerischer Fertigkeiten längst erreicht ist. Der Einfluss der allgemeinen kognitiven Fähigkeiten auf die Mathematikleistung verwundert jedoch kaum, wenn man bedenkt, dass eine gute Leistung in Mathematik verschiedene kognitive Prozesse wie beispielsweise problemlösendes und schlussfolgerndes Denken erfordert (Floyd, Evans & McGrew, 2003). Dass auch Vpn mit einem $IQ < 85$ eingeschlossen wurden, entspricht schlussendlich dem Alltag von Menschen mit Dyskalkulie. Ein Einfluss auf die Ergebnisse kann jedoch nicht ausgeschlossen werden. Kein Zusammenhang konnte zur visuell-räumlichen Merkspanne aufgezeigt werden, was darauf hinweist, dass DD dieser Stichprobe in dieser Fertigkeit keine Einschränkungen aufweisen respektive basisnumerische Fertigkeiten nicht mit der Merkspanne in Zusammenhang zu stehen scheinen. Solche aufgabenabhängigen Resultate wurden mehrfach berichtet (D'Amico & Guarnera, 2005; Geary et al., 1999). Hingegen unterschied sich die Aufmerksamkeitsleistung hinsichtlich der Inhibitionsfähigkeit, indem DD mit einer schlechteren Inhibitionsleistung eine schlechtere Leistung in basisnumerischen Aufgaben zeigten. Dieses Ergebnis könnte auf die hohe Komorbidität mit AD(H)S hinweisen, für das eine eingeschränkte Inhibitionsfähigkeit typisch ist (Czamara et al., 2013). Leider konnten Komorbiditäten aufgrund fehlender Daten nicht erfasst werden, weshalb deren Vorkommen nicht geprüft werden kann.

Weiter resultierte bei den DD ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen dem Gesamtwert des BM 4-8 und der Mathematikangst. Es könnte auf den ersten Blick überraschen, dass die Mathematikangst mit besserer Mathematikleistung steigt. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass bei guten Schülern sowie einem höheren IQ und Bildungsniveau die Relevanz von guten Leistungen steigt und sich damit auch der Druck erhöht. Bei schlechten Schülern hingegen könnte die Frustration bereits Jahre anhalten und die verminderte Angst als Ausdruck von Resignation aufgefasst werden. Bei der KG war der Zusammenhang, wie man ihn eher erwarten würde: je besser die Leistung, umso kleiner die Angst. Eine gute Leistungsfähigkeit scheint bei diesen Personen Sicherheit zu vermitteln und den Druck abzubauen, was auch die Angst verkleinert. Jedoch muss darauf hingewiesen werden, dass Werte des MAI-Fragebogens nicht von allen Vpn vorhanden waren, was die

Ergebnisse verfälschen könnte.

In Bezug auf den Entwicklungsverlauf von basisnumerischen Fertigkeiten zeigte sich bei der KG kein Zusammenhang der Klassenstufe mit dem Gesamtwert im BM 4-8. Diese Kinder scheinen die basisnumerischen Fertigkeiten längst zu beherrschen. Hingegen zeigte sich bei den DD eine bessere Leistung, je höher die Klassenstufe war. Auch DD können also eine Verbesserung der Mathematikleistung über die Zeit erfahren, aber der Abstand zu normentwickelten Kindern bleibt bestehen oder nimmt zu. Dies entspricht den Entwicklungsverläufen F oder G der Einteilung möglicher Entwicklungsverläufe nach Drechsler und Günther (2018) (Abbildung 11). Dass auch in höheren Klassenstufen basisnumerische Aufgaben noch Schwierigkeiten bereiten, zeigt jedoch die Relevanz dieser Fertigkeiten und verweist auf die Persistenz der Störung.

Insgesamt resultierten viele der untersuchten Zusammenhänge nur bei den DD signifikant, was wiederum auf die Heterogenität des Störungsbildes und mögliche Komorbiditäten und Subgruppen, welche als Einflussfaktoren die Rechenleistung beeinflussen könnten, hinweist.

Clusteranalyse. Gewisse Aufgabenarten scheinen besser zwischen der Mathematikleistung von Kindern mit und ohne Dyskalkulie unterscheiden zu können, jedoch sind Fehler, welche DD begehen, relativ durchmischt. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Frage, ob sich Personengruppen je nach Lösungsverhalten unterscheiden lassen. Zwar konnten vier Cluster von Personen mit Dyskalkulie unterschieden werden, jedoch befand sich der grösste Teil der Vpn im ersten Cluster. Einige wenige Personen unterschieden sich demnach vom Rest der Gesamtgruppe der DD. Das erste Cluster schien sich durch eine höhere Intelligenz und besser gebildete Mädchen abzuheben, welche über zusätzliche Ressourcen trotz der schwachen Rechenfertigkeit verfügen. Hier scheinen sich Kompensationsstrategien entfalten zu können, was die guten Inhibitionsressourcen zeigen. Kinder, bei denen diese Fähigkeit zusätzlich zur Dyskalkulie schwach ausfällt (zum Beispiel bei AD(H)S), scheinen beim Lernen stärker beeinträchtigt zu sein und die Chance auf höhere Bildung dürfte sich verringern. Dass ihre Mathematikängstlichkeit verstärkt auftritt, könnte mit dem grösseren Druck der höheren Schulbildung zusammenhängen. Zudem sind Mädchen häufiger von Ängsten betroffen als Jungen (Klasen et al., 2016). Bei den restlichen drei Gruppen fallen die IQ-Werte deutlich tiefer aus. Das zweite Cluster betrifft vor allem Jungen, welche sich dadurch auszeichnen, dass ihre Aufmerksamkeitsfunktionen und die visuell-räumliche Merkspanne gut ausgebildet sind, ihr Bildungslevel etwas tiefer und wenig Angst

vor Mathematik vorhanden ist. Die tiefe Mathematikangst könnte wiederum mit der Geschlechterdiskussion zusammenhängen oder dem tieferen IQ respektive der tieferen Bildungsschicht, was die Relevanz guter Leistungen möglicherweise unwichtiger erscheinen lässt. Das dritte Cluster entspricht ungefähr dem Durchschnitt der DD aller Variablen und fällt durch verringerte Alertness- und Inhibitionsleistungen auf. Hier könnten Komorbiditäten mit AD(H)S vorliegen, die bei Dyskalkulie häufig beobachtet werden (Czamara et al., 2013). Das vierte Cluster enthält die beiden weiblichen Ausreisser hinsichtlich ihrer basisnumerischen Fertigkeiten sowie des tiefen IQ. Insgesamt können die verschiedenen Cluster zwar nicht auf valide Methoden zurückgeführt werden, jedoch liefern sie explorativ ergründete Hinweise, dass Komorbiditäten zu unterschiedlichem Leistungsverhalten und zu Subgruppen führen könnten. Jedoch ist eine genaue Unterteilung oder Komorbiditätenzuteilung anhand dieser Daten schwierig vorzunehmen. Dafür ist die Stichprobe zu klein und die Ergebnisse sind zu heterogen. Die Studie von Krinzinger (2016) hat den BM 4-8 hinsichtlich möglicher Subgruppen bei DD analysiert und kam zum Schluss, dass der Test wertvolle Hinweise für die Differenzialdiagnose von primären und sekundären (zum Beispiel aufgrund von AD(H)S oder Arbeitsgedächtnisstörungen) Rechenstörungen bieten kann, was eine weiterführende Behandlung spezifiziert.

Fragestellungen und Hypothesen. Abschliessend sollen die Fragestellungen kurz beantwortet werden und auf die Hypothesen eingegangen werden.

- *Fragestellung 1:* Signifikante Unterschiede in der Leistung beim Lösen von basisnumerischen Aufgaben können sowohl bezüglich der Gesamtpunktezahl wie auch einzelner Aufgaben bestätigt werden. Zudem bestehen Abweichungen zwischen den Gruppen hinsichtlich Aufgabenart, Inhaltsbereichen sowie Anforderungsniveaus. Die Hypothesen können angenommen werden.
- *Fragestellung 2:* Es zeigt sich klar, dass signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen hinsichtlich der angewendeten Rechenstrategie sowie dem Faktenabruf bestehen. Die Hypothese kann angenommen werden.
- *Fragestellung 3:* Zusammenhänge zur basisnumerischen Leistung werden bezüglich der Mathematikangst (DD und KG), dem IQ (DD) sowie der Inhibitionsleistung (DD) beobachtet, nicht jedoch hinsichtlich der visuell-räumlichen Merkspanne. Die Zusammenhänge zwischen der Leistung im BM 4-8 und der Mathematikangst unterscheiden sich zudem zwischen den Gruppen signifikant. Die Hypothesen können für die domänenübergreifenden Faktoren Mathematikangst, IQ und Inhibition

angenommen werden.

- *Fragestellung 4:* Bei den DD lässt sich im Verlauf der Entwicklung (über die Klassenstufen hinweg) eine Veränderung der basisnumerischen Leistung beobachten. Die Hypothese kann angenommen werden.
- *Fragestellung 5:* Geschlechterspezifische Unterschiede in der Gesamtleistung im BM 4-8 können nicht klar beobachtet werden. Damit kann die Hypothese angenommen werden. Jedoch fiel der Signifikanzwert knapp nicht signifikant aus.
- *Fragestellung 6:* Bei der Bearbeitung basisnumerischer Aufgaben lässt sich bei den DD kein einheitliches Fehlermuster aufzeigen. Das Lösungsverhalten resultiert eher heterogen.
- *Fragestellung 7:* Bestimmte Personengruppen können anhand verschiedener Merkmale beschrieben werden. Aber diese zeigen sich insgesamt ebenfalls relativ heterogen.

Limitierungen und Stärken. Zum Schluss werden noch einige Limitierungen und Stärken der Studie berichtet. Aufgrund des Querschnittstudiendesigns sind keine kausalen Aussagen möglich (Döring, Bortz & Pöschl, 2016). Die Stichprobe fiel zudem eher klein aus und setzte sich aus verschiedenen Quellen zusammen, was die Vergleichbarkeit aufgrund unterschiedlicher Testleiter und Testarten schmälern könnte. Männliche Probanden waren zudem nur in kleiner Anzahl vorhanden und lassen eine Generalisierbarkeit auf DD im Allgemeinen nicht zu. Die zusätzlich erhobenen Daten (visuell-räumliche Merkspanne, Aufmerksamkeit und Mathematikangst) waren leider nicht von allen Vpn vorhanden, was die Aussagekraft der Ergebnisse massiv verringert und weshalb bloss Hinweise für Zusammenhänge interpretiert werden können. Insgesamt muss erwähnt werden, dass der BM 4-8 die formalen Diagnosekriterien einer Rechenstörung, wie sie die Diagnosemanuale erläutern, nicht erfüllt, jedoch kann eine Einschätzung des Förderbedarfs anhand der Ergebnisse vorgenommen werden. Die Aufgaben waren bis auf zwei Ausnahmen zwar trennscharf und sollten demnach gut zwischen den Lösern und Nicht-Lösern unterschieden haben. Dass das Cronbachs Alpha so hoch ausfiel, könnte jedoch auch auf die grosse Menge an Items zurückgeführt werden, weshalb die Reliabilität auch anhand eines anderen Masses (zum Beispiel McDonalds Omega) berechnet werden sollte. Ein weiterer Nachteil zeigt sich in der geringen Anzahl möglicher Punktwerte, welche die Aufgaben des BM 4-8 überhaupt zuliessen (0-2 Punkte). Dies erschwert eine genaue Differenzierung zwischen den Personen hinsichtlich ihrer Verhaltensausrprägung. Weiter wurde der IQ anhand verschiedener Tests ermittelt, was einen Einfluss auf die Ergebnisse nehmen könnte, wovon aufgrund der

Validität der Tests jedoch nicht ausgegangen wird. Zu guter Letzt können weitere Einflussfaktoren wie Mathematiknachhilfeunterricht oder Mathematiktrainings über die letzten Jahre nicht ausgeschlossen werden. Solche Faktoren zu kontrollieren, ist jedoch kaum möglich.

Eine Stärke der Studie besteht darin, dass laut aktuellen Kenntnissen keine Analyse hinsichtlich der Rechenschwierigkeiten bei Kindern mit Dyskalkulie je nach Aufgabentyp vorgenommen wurde. Dies hat jedoch grosse Relevanz für die Diagnostik und Förderung, um spezifisch an jenen Stellen anknüpfen zu können, an denen Schwierigkeiten auftauchen. Ist es möglich, die basisnumerischen Fertigkeiten zu verbessern, kann sich die weitere mathematische Entwicklung besser etablieren. Zudem wurden auch ältere Vpn im Nachschulbereich einbezogen, welche in Studien aufgrund ihres Alters kaum untersucht werden, jedoch aufgrund der Persistenz der Störung (Geary et al., 2000; Stern, 2008) ebenso betroffen sind. Denn wie ersichtlich wurde, ist das Alter bei Dyskalkulie nicht zwingend der ausschlaggebende Faktor dafür, wie gut die basisnumerischen Fertigkeiten erworben wurden. Dass verschiedene Faktoren wie die Mathematikangst, Aufmerksamkeitsfunktionen sowie die visuell-räumliche Merkspanne mit eingeschlossen wurden, zeigt sich gerade hinsichtlich der häufigen Komorbiditäten und möglichen Subgruppen als hilfreich. Weil solche Merkmale bei Dyskalkulie häufig in Erscheinung treten, sollten sie in der Untersuchung für ein Gesamtbild auch enthalten sein. Das teilweise explorative Vorgehen schliesslich erlaubt zwar keine gesicherten Aussagen, jedoch erscheint es sinnvoll, sich damit Fragen zuzuwenden, zu denen es noch wenige Kenntnisse gibt.

Schlussfolgerungen und Fazit. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die basisnumerischen Fertigkeiten bei DD klar eingeschränkt sind und auch ältere Kinder und Gymnasiasten an solchen Aufgaben scheitern. DD gelingt es weniger gut, effiziente Strategien anzuwenden, weshalb diese in Testverfahren differenziert erfasst werden sollten. Das heterogene Bild der Resultate passt gut zum heterogenen Störungsbild der Dyskalkulie. Dass Kinder mit zusätzlichen Ressourcen Kompensationsstrategien anwenden und Personen in höherer Schulbildung wohl bereits seit vielen Jahren einen hohen Übungsaufwand tätigen müssen, könnte das Bild der Dyskalkulie weniger deutlich ausfallen lassen. Grundsätzlich sind Einschränkungen im Rechnen zwar vorhanden, die mathematische Leistung wird jedoch durch viel Trainingsaufwand näher an die Leistung der KG herangebracht. Auch vorhandene Komorbiditäten wie AD(H)S dürften das heterogene Bild der Ergebnisse mitbestimmt haben und sollten in der Praxis unbedingt berücksichtigt werden. Die gewonnenen Kenntnisse

können einen wichtigen Beitrag für eine erhöhte Validität von Testinstrumenten sowie eine differenzierte Diagnosestellung bei Dyskalkulie leisten und Aufgaben identifizieren, welche in Form eines Screening-Verfahrens für eine erste Einschätzung des Störungsbildes eingesetzt werden können. Dafür sind Aufgaben aus Tests wie dem BM 4-8, die ein differenziertes Bild schaffen, gut geeignet, sie sollten unbedingt in der Dyskalkulie-Diagnostik einen festen Platz einnehmen. Weil der weitere mathematische Kompetenzerwerb auf den basisnumerischen Fertigkeiten aufbaut und zukünftige Erfolgchancen teilweise davon abhängen (Siegler, 1996) ist es äusserst wichtig, diese früh zu untersuchen und spezifische Interventionen, welche auf das Individuum abgestimmt sind, einzuleiten sowie spezifische nachteilsausgleichende Massnahmen auszusprechen.

MRT-Studie

Theoretischer Hintergrund

Im zweiten Teil der Masterarbeit wurde eine MRT-Studie durchgeführt, bei der die neuronale Struktur von Kindern und Jugendlichen mit und ohne Dyskalkulie analysiert wurde. Nachdem die Kenntnisse aus der Hirnforschung bezüglich der typischen Entwicklung von Zahlenverarbeitung und Rechnen bei Kindern bereits vorgestellt wurden, wird nun die atypische Entwicklung respektive auf spezifische neuronale Korrelate von Rechenschwierigkeiten bei Kindern fokussiert.

Neuronale Korrelate von Rechenschwierigkeiten. Befunde zur Gehirnstruktur und -funktion von Kindern und Jugendlichen, welche Auffälligkeiten in jenen Gehirnregionen aufweisen, welche mit der Zahlenverarbeitung und dem Rechnen in Zusammenhang stehen, liegen noch nicht in grossem Umfang vor. Insbesondere Längsschnittuntersuchungen über längere Zeiträume gibt es kaum. Folglich bleiben viele Fragen bezüglich funktioneller und struktureller Besonderheiten bei Dyskalkulie im Vergleich zu Kindern ohne Rechenstörungen, aber auch hinsichtlich entwicklungsbedingter Veränderungen, offen. Um einen Gesamtüberblick über den heutigen neurowissenschaftlichen Forschungsstand bei Dyskalkulie (respektive Kindern mit tiefen Rechenleistungen) aufzuzeigen, sollen Erkenntnisse zur Gehirnfunktion, -struktur und -konnektivität aufgezeigt werden.

Gehirnfunktion. Zu veränderten Gehirnfunktionen bei Kindern mit einer Rechenstörung liegen inzwischen mehrere Studien hinsichtlich verschiedener Rechenarten vor. Die Befunde fallen dabei insbesondere bei fMRT-Studien eher gemischt aus. Dies liegt möglicherweise an den uneinheitlich gewählten mathematischen Aufgabenstellungen, welche einen grossen Einfluss auf die Gehirnaktivierung ausüben. Befunde zu domänenspezifischen atypischen Aktivierungsmustern in intraparietalen Gehirnarealen, welche eine Schlüsselrolle für die Verarbeitung von numerischer Grösseninformation spielen, wurden erstmals von Siegler (1996) beschrieben und später wiederholt repliziert. Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Repräsentation numerischer Grösse bei DD weniger gut automatisiert und ausgebildet ist (Moeller et al., 2017).

Die Aktivierungsmuster der verschiedenen Studien waren jedoch nicht konsistent. Dabei wiesen die Ergebnisse sowohl auf eine verminderte wie auch eine gesteigerte Aktivierung hin. Auf eine verminderte Aktivierung parietaler Areale, insbesondere des IPS, bei Aufgaben zum Mengenvergleich (Kaufmann et al., 2011), Zahlenvergleich (Mussolin et al., 2010) und beim Rechnen (Kucian et al., 2006) wiesen verschiedene Studien hin. Diese

Ergebnisse könnten laut De Smedt et al. (2019) darauf zurückgeführt werden, dass sich bei Kindern mit Rechenstörungen die zuvor erwähnte Spezialisierung des Parietalkortex zur Verarbeitung von Mengen verzögert oder gestört entwickelt. Keine Unterschiede zwischen DD und der KG resultierten beim Lösen von nonsymbolischen Zahlenvergleichsaufgaben in den Studien von Kovas et al. (2009) und Kucian et al. (2006). Dies passt zur Beobachtung, dass Defizite bezüglich der nonsymbolischen Zahlenverarbeitung bei DD weniger konsistent ausfallen als bezüglich der symbolischen Zahlenverarbeitung (De Smedt et al., 2013). Von einer stärkeren Aktivierung in (intra-)parietalen Gehirnregionen berichtete Kaufmann (2008).

Uneinheitliche Befunde betreffen auch extraparietale Regionen. In einer Metaanalyse von Kaufmann et al. (2011) resultierten bei DD schwächere aufgabenabhängige Aktivierungen in frontalen und okzipitalen Gehirngebieten, was als beeinträchtigte aufmerksamkeitsbezogene und visuelle Prozesse interpretiert werden kann. In der gleichen Studie berichteten die Autoren von stärkeren aufgabenabhängigen Aktivierungen in frontalen, parietalen und postcentralen Regionen, was möglicherweise auf kompensatorische Prozesse hindeutet. Interessanterweise lässt sich bei DD keine klare Schwierigkeitsmodulation fronto-parietaler Netzwerke beobachten (De Smedt, Holloway & Ansari, 2011). Das bedeutet, dass bei Kindern mit einer Rechenstörung für einfache wie auch schwierige Aufgaben das gleiche Ausmass an Gehirnaktivität des IPS beobachtet wird. Es könnte sein, dass diese für jegliche Rechenaufgaben vermehrt prozedurale Strategien anwenden müssen (Geary, 2011). Mögliche Erklärungen für die widersprüchlichen Ergebnisse bieten Kucian et al. (2006), die beobachteten, dass die Heterogenität der Aktivierungsmuster bei Kindern mit Rechenstörungen signifikant grösser ausfallen. Befunde aus Verhaltensstudien zeigen zudem passend auf, dass die Leistungen von DD sowohl bezüglich ihrer Rechenleistungen wie auch der domänenübergreifenden Fähigkeiten unterschiedlich ausfallen (Moeller et al., 2017).

Gehirnstruktur. Weit weniger erforscht sind die neuronalen Strukturen bei Kindern mit Rechenstörungen. Rotzer et al. (2008) sowie Isaacs, Edmonds, Lucas und Gadian (2001) beobachteten bei DD im Vergleich zu Kindern mit unauffälligen Rechenleistungen anhand der VBM eine geringere Dichte der GM und damit der Neuronendichte in verschiedenen zahlenrelevanten Regionen wie dem posterioren Parietalkortex mit dem IPS, frontalen Regionen wie dem anterioren Cingulum und dem inferioren und medialen Gyrus frontalis. Auch im parahippocampalen Gyrus (Ranpura et al., 2013) und im okzipito-temporalen Kortex (Han et al., 2013) konnte bei DD eine verringerte GM beobachtet werden. Zu

ähnlichen Resultaten kamen Rykhlevskaia, Uddin, Kondos und Menon (2009), die ebenfalls bilaterale Volumenminderungen in der GM in (intra-)parietalen Arealen fanden, welche spezifisch mit der Verarbeitung numerischer Grösseninformation assoziiert sind, im Gyrus fusiformis im okzipitalen Kortex, welcher für die Verarbeitung visueller Zahlensymbole zuständig ist, sowie in parahippocampalen und anterior temporalen Regionen, welche in Verbindung mit Funktionen des Langzeitgedächtnisses stehen (Klein et al., 2016).

Bezüglich des Volumens der WM wiesen Kinder mit Rechenstörungen eine geringere Dichte axonaler Verbindungen zwischen verschiedenen Gehirnregionen auf. Rykhlevskaia et al. (2009) interpretierten dabei die fronto-parietalen Volumenminderungen in der GM und WM als strukturelles Korrelat der Rechenschwierigkeiten, welches den Ergebnissen der funktionellen Untersuchungen entspricht. Die Abweichungen der WM in (para-)hippocampalen Arealen dürften hingegen mit den beobachteten Schwierigkeiten beim arithmetischen Faktenabruf in Verbindung stehen. Die mikrostrukturellen Veränderungen korrelierten dabei nur mit den Rechenleistungen, nicht aber mit den Leseleistungen oder dem mathematischen Schlussfolgern.

Die erste Längsschnittstudie, welche sich mit möglichen Unterschieden in der Gehirnstruktur zwischen Kindern mit und ohne Rechenstörung befasst hat, stammt von McCaskey, von Aster, O’Gorman und Kucian (2020). Diese untersuchten die Entwicklung der GM und WM bei Kindern mit und ohne Dyskalkulie. Dabei zeigte sich über den Entwicklungsverlauf ein dauerhaft reduziertes Volumen der GM und WM, wobei die reduzierte GM den bilateralen inferioren Parietallappen (Gyrus supramarginalis), den linksseitigen Präcuneus, den rechtsseitigen superioren Gyrus okzipitalis, den bilateralen inferioren und medialen Gyrus temporalis sowie die Insula betrafen. Die reduzierte WM zeigte sich beim bilateralen inferioren und superioren Fasciculus longitudinalis, beim inferioren fronto-okzipitalen Fasciculus, bei den kortikospinalen Trakten und dem rechtsseitigen anterioren Radiatio thalami. Zudem lösten Kinder mit Dyskalkulie verschiedene numerische Aufgaben zu beiden Messzeitpunkten signifikant schlechter als die Kontrollkinder, was persistente Defizite in der Zahlenverarbeitung bestätigte.

Konnektivität. Da beim Rechnen ein ganzes Netzwerk aktiv ist, ist es relevant, verschiedene entfernte Gehirngebiete zu untersuchen, die anhand von Trakten der WM miteinander verbunden sind und welche die Kommunikation zwischen den Arealen erlauben (Mori & Zhang, 2006). Im Unterschied zu der Analyse mit der VBM kann die Konnektivität anhand der Diffusion-Tensor-Imaging-Methode (DTI) in vivo gemessen werden. DTI-

Messungen basieren auf strukturellen MRT-Messungen, anhand derer die Leistungsfähigkeit der WM visualisiert und quantifiziert werden kann. Diese Methode wurde bei Kindern mit Rechenstörungen bis anhin nur selten angewendet, beispielsweise von Kucian et al. (2014). Diese untersuchten die strukturelle Konnektivität und fanden atypische Faserverbindungen zwischen frontalen, temporalen und parietalen Hirngebieten, insbesondere beim superioren Fasciculus longitudinalis. Bei Kindern mit Dyskalkulie resultierte eine verminderte fraktionale Anisotropie, was auf eine Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit der WM hinweisen könnte. Des Weiteren zeigte sich im Bereich des IPS eine geringere Konnektivität. Die Autoren beschreiben Rechenstörungen als sogenanntes Diskonnektionssyndrom, wobei das kognitive Defizit durch mangelnde Konnektivität der beteiligten Gehirngebiete erklärt wird (Hypokonnektivitätshypothese). Die Ergebnisse passen insgesamt gut zu der berichteten erhöhten Variabilität der Aktivierungsmuster bei Kindern mit Dyskalkulie (De Smedt, Noël, Gilmore & Ansari, 2013). Kucian et al. (2014) replizierten damit die Ergebnisse der Untersuchung von Rykhlevskaia et al. (2009), welche die Methode der VBM angewendet hatten.

Im Gegensatz dazu postulierten Rosenberg-Lee et al. (2015) etwas später anhand der untersuchten funktionellen Konnektivität ein Hyperkonnektivitätssyndrom. Bei Kindern mit Rechenschwierigkeiten resultierten beim Lösen von Additions- und Subtraktionsaufgaben stärkere Aktivierungen in (intra-)parietalen und okzipito-temporalen Gehirngebieten. Im Vergleich zur KG bestand eine grössere funktionale Konnektivität zwischen diesen Hirnarealen. Jolles et al. (2016) untersuchten zudem die Ruhenetzwerke dyskalkulischer Kinder und wiesen eine erhöhte interhemisphärische IPS-Konnektivität sowie eine erhöhte Konnektivität zwischen IPS und (dorsalen) fronto-parietalen Regionen auf.

Man könnte meinen, dass die inkonsistenten Ergebnisse der Studien von Kucian et al. (2014) und Rosenberg-Lee et al. (2015) sich widersprechen. Jedoch stimmen die Gehirnregionen respektive Verbindungen der (intra-)parietalen und okzipito-temporalen neuronalen Netzwerke überein. Moeller et al. (2017) schlussfolgern, dass die verstärkte gemeinsame Aktivierung und damit die funktionelle Konnektivität dieser Gehirnareale eine Folge der beeinträchtigten strukturellen Konnektivität sein könnte. Das bedeutet, dass schlechter verbundene Gehirnareale eine stärkere, kompensatorische Aktivierung der Gehirngebiete erfordert, damit die Rechenleistung ausgeführt werden kann.

Fragestellungen und Hypothese

Die Forschung gelangt bei Dyskalkulie-Studien mit Kindern also zu unterschiedlichen Ergebnissen und Interpretationen und lässt noch viele Fragen offen. Die Studien weisen aber eindeutig darauf hin, dass beim Rechnen und bei der Zahlenverarbeitung ein weit verbreitetes neuronales Netzwerk aktiv ist (Abbildung 3, Kucian, 2016). Folglich erscheint es sinnvoll, sich bei der Untersuchung von Hirnstrukturen nicht auf ein einzelnes Gehirngebiet zu beschränken. In dieser Studie wurde bei der Analyse von möglichen strukturellen Unterschieden zwischen DD und einer KG deshalb das gesamte Gehirn miteinbezogen. Im Interesse standen einerseits eine Replikation hinsichtlich möglicher Unterschiede des Volumens der GM zwischen Kindern mit und ohne Dyskalkulie, andererseits Kennwerte der SBM, die, so weit bekannt, bei Kindern im Zusammenhang mit Dyskalkulie noch nie genauer untersucht wurden. Folglich war das Ziel, erstmals Analysen zur Identifikation möglicher Unterschiede der kortikalen Dicke, kortikalen Oberflächenkomplexität, Gyrifikation und sulcalen Tiefe bei Kindern mit und ohne Dyskalkulie durchzuführen. Folgende Fragestellungen, Hypothese und Annahmen haben sich aus den theoretischen Inhalten und aus eigenen Überlegungen ergeben:

1. Gibt es einen signifikanten Unterschied in der Gehirnstruktur hinsichtlich des Volumens der GM zwischen Kindern mit und ohne Dyskalkulie?
H1: Es gibt einen signifikanten Unterschied in der Gehirnstruktur hinsichtlich des Volumens der GM zwischen Kindern mit und ohne Dyskalkulie.
2. Gibt es einen signifikanten Unterschied in der Gehirnstruktur hinsichtlich der kortikalen Dicke, kortikalen Oberflächenkomplexität, Gyrifikation sowie sulcalen Tiefe zwischen Kindern mit und ohne Dyskalkulie?

Annahme und Begründung: Die Forschung verfügt noch über wenige Studien hinsichtlich der Gehirnstruktur bei Kindern mit Dyskalkulie. Jedoch lässt der aktuelle Forschungsstand vermuten, dass verschiedene Hirngebiete, die in die Zahlenverarbeitung und das Rechnen eingebunden sind, verändert sein könnten. Dazu gehören parieto-frontale (Isaacs et al., 2001; Ranpura et al., 2013; Rotzer et al., 2008; Rykhlevskaia et al., 2009), okzipito-temporale (Han et al., 2013) und parahippocampale Regionen sowie die Insula (Ranpura et al., 2013). Deshalb ist davon auszugehen, dass die Hypothese bezüglich des Volumens der GM angenommen werden kann. Unterschiede sollten sicherlich in parietalen Regionen beobachtet werden, welche als spezialisiertes Kerngebiet der numerischen Verarbeitung gelten (Rosenberg-Lee et al., 2015), aber auch weitere Gehirngebiete des Netzwerkes, das beim

Rechnen beteiligt ist, könnten Abweichungen aufzeigen. Hinsichtlich der Merkmale der kortikalen Oberfläche können keine Vorannahmen getroffen werden. Diese werden explorativ ergründet. In der Studie von Moreau, Wiebels, Wilson und Waldie (2019), welche erwachsene Personen mit und ohne Dyskalkulie anhand der SBM untersucht haben, resultierten keine Unterschiede. Jedoch können Ergebnisse von Erwachsenen nicht direkt auf Kinder übertragen werden.

Methoden

Studiendesign. Bei dieser Untersuchung handelt es sich um eine MRT-Querschnittsstudie mit einem Between-Subjects-Design, welche strukturelle neuronale Unterschiede zwischen Kindern und Jugendlichen mit und ohne Dyskalkulie untersucht hat. Die MRT-Daten stammen aus zwei Studien aus dem MR-Forschungszentrum des Kinderspitals Zürichs. Diese Studien wurden von der Kantonalen Ethikkommission Zürich bewilligt. Neben den Daten aus den bildgebenden Verfahren liegen Verhaltensdaten aus neuropsychologischen Tests vor. Alle Vpn (oder deren Eltern) haben eine Einverständniserklärung unterschrieben. Die Fälle wurden mit Hilfe einer zufällig zugewiesenen Nummer anonymisiert.

Stichprobe und Rekrutierung. Untersucht wurden MRT-Bilder von Kindern und Jugendlichen, welche im MR-Forschungszentrum an zwei Studien teilgenommen hatten (Karin Kucian et al., 2018; McCaskey et al., 2020). Die Zuweisung der Vpn zu den Gruppen (DD vs. KG) wurde anhand derer Leistungen in zwei standardisierten Rechentests vorgenommen. Die Vpn wurden der Dyskalkulie-Gruppe bei folgenden Resultaten zugeteilt: entweder wurde im BM 4-8 das Kriterium *basisnumerischer Rechenstoff nicht verstanden* (< 67 Punkte) erreicht oder es lag im ZAREKI-R der Gesamtwert im kritischen Bereich (1.28 SD unter dem Mittelwert) respektive war der Gesamtwert grenzwertig und lagen ein Indexwert beziehungsweise mindestens drei Subtests im kritischen Bereich. Lag ein Wert im Toleranzbereich des BM 4-8 vor und ein kritischer Wert im ZAREKI-R, wurden die Kinder ebenfalls der Dyskalkulie-Gruppe zugewiesen. Resultierte hingegen nur ein BM 4-8-Wert im Toleranzbereich, wurden sie ausgeschlossen. Dieses Vorgehen sollte eine klare Abgrenzung und möglichst grosse Diskrepanz zur KG schaffen, um mögliche Unterschiede aufzuzeigen. Als Ausschlusskriterien galten zudem neurologische, psychiatrische und entwicklungsbedingte Störungen sowie schlechte Bildqualitäten der MR-Bilder. Schlussendlich wurden drei Vpn aufgrund unklarer Zuordnung zu den Gruppen, zwei Vpn aufgrund neurologischer und psychiatrischer Erkrankungen sowie 16 Vpn wegen

Datenqualitätsproblemen (Artefakte aufgrund von Zahnsparungen etc.) ausgeschlossen. Als Einschlusskriterium galt ein $IQ > 85$. Die Stichprobe bestand schliesslich aus 29 Vpn in der Gruppe mit Dyskalkulie (21 Mädchen, 8 Jungen) im Alter zwischen 7.75 und 16.5 Jahren ($M = 12.15$, $SD = 2.41$) und 23 Vpn in der Gruppe ohne Dyskalkulie (18 Mädchen, 5 Jungen) im Alter zwischen 8.67 und 16.5 Jahren ($M = 12.19$, $SD = 2.26$). Die beiden Gruppen unterschieden sich nicht signifikant in ihrem Geschlecht ($\chi^2(1) = 0.23$, $p = .752$, $n = 52$), der Händigkeit (Exakter Test nach Fisher, $p = .905$) sowie in ihrem Alter ($t(52) = 0.05$, $p = .960$). Jedoch zeigte sich ein signifikanter Unterschied hinsichtlich des IQ (Mann-Whitney- U -Test: $U = 73.50$, $p < .001$) mit einer starken Effektstärke von $r = .67$ ($IQ_{DD} = 99.5$, $IQ_{KG} = 107.8$) sowie des intrakraniellen Volumens (TIV) ($t(52) = 2.68$, $p = .010$), mit einer mittleren Effektstärke ($r = .35$) ($TIV_{DD} = 1387.58 \text{ cm}^3$, $TIV_{KG} = 1471.82 \text{ cm}^3$).

Neuropsychologische Testverfahren. Zur Messung der Verhaltensdaten wurde die Testbatterie Wechsler Intelligenztest für Kinder (WISC-IV, Petermann & Petermann, 2007; 46 Vpn), der BM 4-8 (Moser Opitz et al., 2010; 36 Vpn), der ZAREKI-R (von Aster, Weinhold Zulauf & Horn, 2006; 42 Vpn), der Corsi-Block-Suppression-Test (Beblo, Macek, Brinkers, Hartje & Klaver, 2004; 46 Vpn) und das Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971; 52 Vpn) eingesetzt. Folgend werden ergänzend noch jene Tests vorgestellt, welche nicht bereits im Rahmen der Verhaltensstudie beschrieben wurden.

WISC-IV. Der WISC-IV (Petermann & Petermann, 2007) wurde für die Erfassung des IQ herangezogen. Der Test misst das allgemeine kognitive Leistungsniveau im Alter von 6 bis 16 Jahren. Bei Kindern jünger als 12 Jahre wurden die Leistungen der Untertests Wortschatz-Test, Rechnerisches Denken, Gemeinsamkeiten finden, Zahlenspanne, Bilder ergänzen und Mosaik-Test zu einem mittleren IQ-Wert verrechnet (PR 0-100). Bei Kindern älter als 12 Jahre wurden für die Berechnung des IQs die Untertests Gemeinsamkeiten finden, Mosaik-Test, Zahlenspanne und Matrizen-Test verwendet.

Corsi-Block-Suppression-Test. Mit dem Corsi-Block-Suppression-Test (Beblo et al., 2004) wird das visuell-räumliche Arbeitsgedächtnis erfasst. Im Gegensatz zum Corsi soll nicht die gesamte Sequenz nachgetippt, sondern bei der Wiedergabe jeder zweite Block ausgelassen werden. Die längste zweimalig korrekt wiederholte Sequenzlänge wird als Kennwert genommen.

ZAREKI-R. Der ZAREKI-R ist eine neuropsychologische Testbatterie und misst die Leistung der Zahlenverarbeitung und des Rechnens bei Kindern von der zweiten bis zur

vierten Klasse (von Aster et al., 2006). Mit 12 Untertests werden verschiedene Komponenten numerischer Fertigkeiten erfasst, was eine qualitative und quantitative Erfassung zentraler Aspekte der Zahlenverarbeitung und des Rechnens ermöglicht.

Edinburgh Handedness Inventory. Zur Bestimmung der Händigkeit wurde das Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971) eingesetzt.

Datenverarbeitung. Die MRT-Daten wurden auf einem 3T General Electric Discovery 750 Scanner (GE Medical Systems, USA) erworben. Dafür wurde eine 8-Kanal-Kopfspule verwendet. Bei 46 MRT-Scans wurden anhand einer spoiled Gradientenecho-Sequenz (3D SPGR, Anzahl Schichten = 172, Schichtdicke (ST) = 1 mm, kein Zwischenschichtabstand, Matrixgrösse (MS) = 256x256, field of view (FOV) = 256 mm, FA = 8°, TE = 3 ms ($n = 17$) oder 5 ms ($n = 29$), TR = 10 ms ($n = 17$) oder 11 ms ($n = 29$)), parallel zur anterior-posterioren Kommissurenlinie, dreidimensionale T1-gewichtete strukturelle anatomische Bilder des gesamten Gehirns aufgenommen. Für weitere sechs MRT-Scans wurde eine fast spoiled Gradientenecho-Sequenz (3D FSPGR, ST = 1 mm, kein Zwischenschichtabstand, MS = 256x192, FOV = 240x192 mm, FA = 20°, TE = 3 ms, TR = 10 ms) verwendet. Die unterschiedlichen Echosequenzen (SPGR und FSPGR) sind entstanden, weil zwischen den Studien der MRT-Scanner ausgewechselt werden musste. Bevorzugt eingeschlossen wurden stets die SPGR-Scans, die der neueren Sequenz entsprechen. Die beiden Gruppen unterschieden sich jedoch nicht signifikant hinsichtlich der Sequenzen ($\text{Chi-Quadrat}(1) = 2.94, p = .117, n = 52$). Dieses Vorgehen wurde als unproblematisch erachtet, da alle Sequenzen fast spoiled Sequenzen darstellen und damit vergleichbar sind. Zudem wird von Gaser und Dahnke (2016) beschrieben, dass zur Prüfung der Validität von MR-Analysen verschiedene Bildkontraste unterschiedlicher Datensätze getestet wurden und selbst diese eine vergleichbare Qualität aufwiesen.

Analyse.

Verhaltensdaten. Die Analysen der Verhaltensdaten wurden mit SPSS (Version 26) vorgenommen. Mit dem Shapiro-Wilk-Test wurde die Normalverteilung geprüft. Weil keine Normalverteilung vorlag, wurden Gruppenunterschiede mit dem Mann-Whitney-U-Test analysiert. Die Beurteilungen der Effektstärken entsprechen erneut jenen von Cohen (1992) (siehe Verhaltensstudie). Gruppenunterschiede mit nominalen Daten wurden mit dem Chi-Quadrat-Test berechnet. Da die IQ-Variable anhand verschiedener Tests erhoben wurde und aus verschiedenen Subtests zusammengesetzt ist, wurde als Vergleich eine einheitliche IQ-Variable mit den Untertests Mosaik-Test, Gemeinsamkeiten finden und Zahlenspanne

gebildet. Ein Mann-Whitney-U-Test zeigte, dass die Unterschiede zwischen den Gruppen bei der einheitlichen IQ-Variable ähnlich ausfielen (Mann-Whitney-U-Test: $U = 96.50, p < .001$) wie bei der durchmischten IQ-Variable (Mann-Whitney-U-Test: $U = 73.50, p < .001$). Zur Beschreibung des IQ wurde auf die durchmischte IQ-Variable zurückgegriffen, weil diese mit mehr Untertests eine genauere Einschätzung der allgemeinen Intelligenz erlaubt. Weil zudem einige der Vpn innerhalb der Studien an einem Mathematiktraining teilgenommen hatten, sollte sichergestellt werden, dass mögliche Gruppenunterschiede der Gehirnstrukturen nicht auf den Einfluss des Scanzeitpunktes zurückzuführen waren. Deshalb wurde erfasst, ob die MRT-Aufnahme direkt nach dem Mathematiktraining stattgefunden hat. Ein Chi-Quadrat-Test zeigte, dass die Gruppen sich auch hinsichtlich des Scanzeitpunktes nicht signifikant voneinander unterscheiden (Chi-Quadrat(1) = 2.13, $p = .182, n = 52$).

Zur Prüfung möglicher Unterschiede der neuronalen Strukturen zwischen den Gruppen wurde schliesslich eine Kovarianzanalyse (ANCOVA) durchgeführt, wobei die jeweiligen Gehirnkennwerte von kortikalen und subkortikalen Hirnbereichen die abhängigen Variablen sowie die Gruppe (DD vs. KG) die unabhängige Variable darstellten. Geschlecht, Alter und TIV wurden als Kovariate in die Analyse eingeschlossen, um Unterschiede aufgrund des Geschlechts, Alters und Gehirnvolumens auszuschliessen. Obwohl der IQ zwischen den Gruppen signifikant unterschiedlich ausfiel, wurde dieser nicht als Kovariate eingeschlossen. Diese Entscheidung wurde getroffen, weil der IQ, der das allgemeine kognitive Leistungsniveau beschreibt, verschiedene korrelierte Fähigkeiten misst und häufig auch mit den untersuchten abhängigen neuropsychologischen Variablen in Zusammenhang steht (Dennis et al., 2009). Die Autoren fügen weiter an, dass abhängig vom Ausmass, mit dem der IQ die gleichen Prozesse wie jene des untersuchten Konstruktes repräsentiert, eine IQ-Kovariate Variabilität entfernt, die in direktem Zusammenhang mit der im Interesse stehenden Variable steht. Diese Tatsache erschwert es, abschliessende Schlussfolgerungen zu ziehen. Aus Interesse, und um der nicht abgeschlossenen Diskussion über den Einbezug der IQ-Kovariate gerecht zu werden, wurden die Analysen auch mit kontrolliertem IQ berechnet und die Ergebnisse kurz vergleichend berichtet. Jedoch wird in der folgenden Diskussion der Fokus auf den Ergebnissen liegen, die ohne IQ-Kovariate resultiert sind.

Voxelbasierte Morphometrieanalyse. Die Daten der Gehirne aus der MRT-Bildgebung wurden mit der Software Computational Anatomy Toolbox (CAT12, Gaser & Dahnke, 2016), die auf der SPM (SPM12, Wellcome Department of Imaging Neuroscience, London, UK) Software beruht, auf einem Linux-System bearbeitet. Für die Analyse wurden

T1-gewichtete Bilder verwendet. Da bei der räumlichen Normalisierung und Segmentierung von kindlichen Gehirnen anhand von Erwachsenen-Templates Verzerrungen und Fehler auftreten könnten, wurde für das in der Vorverarbeitung benötigte Template mit der CerebroMatic Toolbox, V1.3 (Wilke, Holland, Altaye & Gaser, 2008) ein eigenes Kinder-Template erstellt, welches hinsichtlich Alter, Geschlecht und Tesla-Stärke auf die eigene Stichprobe angepasst wurde.

Vorverarbeitung. Als erster Schritt der anfänglichen Vorverarbeitung wurden alle T1-gewichteten Bilder gefiltert (Manjón et al., 2010), affin registriert und einer standardmässigen Einheitssegmentierung unterzogen (Ashburner & Friston, 2005). Dabei wurde das Gewebe in GM, WM sowie CSF klassifiziert und für Verzerrungen korrigiert. Bei der Segmentierung wurden anhand von Grauwertintensitäten die Wahrscheinlichkeiten jedes Datenpunktes berechnet, zu einer der Substanzgruppen zu gehören. Die folgende verfeinerte Vorverarbeitung verwendete die Ausgabe der einheitlichen Segmentierung und entfernte den Schädel, unterteilte das Gehirn in verschiedene Bestandteile (linke und rechte Hemisphäre, subkortikale Bereiche und das Kleinhirn) und führte eine Segmentierung anhand einer partiellen Volumenschätzung durch (Tohka, Zijdenbos & Evans, 2004). Schliesslich wurden die Gewebesegmente in einen Standardraum gebracht (räumliche Normalisierung), wofür einerseits das eigens erstellte Kinder-Template sowie andererseits das von CAT12 zur Verfügung stehende DARTEL-Template verwendet wurde (Ashburner, 2007). Schliesslich wurden die Bilder mit einem Gaussian-Kernel von 6 mm Full Width at Half Maximum (FWHM) geglättet (Smoothing). Jedes Voxel der geglätteten Bilder enthielt dabei die gemittelte Konzentration der Substanz aus der Umgebung des jeweiligen Voxels.

Bildqualität. Die Bilder wurden zunächst anhand des IQR-Wertes (image quality rating) überprüft. Dieser enthält Masse, welche die Bildqualität vor den durchgeführten Vorverarbeitungsschritten betrifft. Der IQR-Wert sollte einen Wert grösser als 70 aufweisen, was bei allen Bildern der Fall war. Danach wurde eine visuelle Kontrolle vorgenommen und 16 MRT-Bilder mit Artefakten und schlechter Bildqualität wurden ausgeschlossen.

Statistische Analysen. Die Analysen zur Berechnung der Volumina je Voxel wurden anhand einer ANCOVA mit einem absoluten Threshold Masking von 0.1 vorgenommen, wobei das TIV, Alter und Geschlecht als Kovariate eingeschlossen wurden. Für die second-level Analysen wurden Kontraste des Faktors Gruppe ($DD > KG$ und $DD < KG$) und ein Signifikanzkriterium von $p < .001$ verwendet und anhand eines cluster-extent threshold (k) für multiple Vergleiche korrigiert. Die resultierenden Cluster beschreiben unterschiedliche

Voxel (Volumen) der GM zwischen den Gruppen. Für die anatomische Lokalisationen der Cluster wurde schliesslich die SPM Anatomy Toolbox (Eickhoff et al., 2007, 2005) verwendet und mit Angaben von MNI-Koordinaten und Voxelgrössen ergänzt berichtet.

Oberflächenbasierte Morphometrieanalyse.

Vorverarbeitung. Die Analyse der SBM entspricht jener der VBM und wird um einige weitere Schritte ergänzt. Grundsätzlich wird bei der Analyse die kortikale Oberfläche extrahiert und nach innen zur WM sowie nach aussen zur CSF respektive zur Pia mater abgegrenzt. Berechnet wurden die oberflächenbasierten Kennwerte kortikale Dicke, kortikale Oberflächenkomplexität, Gyrifikationsindex sowie die sulcale Tiefe. Die kortikale Dicke beschreibt dabei die Distanz von der inneren (Grenze zwischen GM und WM) zur äusseren Oberfläche (Grenze zwischen GM und CSF) (Dahnke, Yotter & Gaser, 2013). Die kortikale Oberflächenkomplexität (Yotter, Nenadic, Ziegler, Thompson & Gaser, 2011) charakterisiert anhand der räumlichen Häufigkeit der Gyrifikation und Fissuration die Oberflächenform des Gehirns. Der Gyrifikationsindex (Luders et al., 2004) misst die regionale Oberflächenwölbung (Konvexität und Konkavität) und ist definiert als Verhältnis der inneren zur äusseren Oberflächengrösse einer Wölbung. Die sulcale Tiefe (Yotter et al., 2011) schliesslich basiert auf der quadrierten euklidischen Distanz zwischen der zentralen Oberfläche (Durchschnitt der inneren und äusseren Oberfläche) und ihrer konvexen Oberflächenwölbung. Zur Berechnung der kortikalen Dicke wurde ein Gaussian-Kernel von 15 mm FWHM, für die sulcale Tiefe, Gyrifikation und Oberflächenkomplexität von 20 mm gewählt.

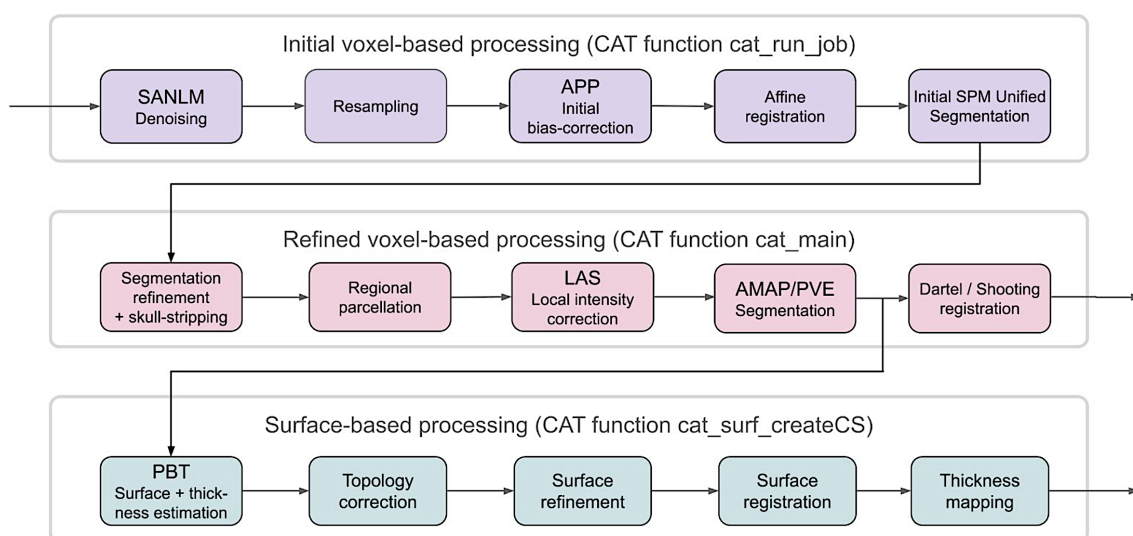


Abbildung 15. Schematischer Ablauf der Verarbeitungsschritte sowohl der VBM als auch der SBM mit der CAT12-Software (Gaser&Dahnke, 2016).

Statistische Analysen. Die Analysen und anatomischen Zuordnungen wurden entsprechend der VBM vorgenommen. Deshalb werden sie an dieser Stelle nicht mehr beschrieben. Einzig soll darauf hingewiesen werden, dass die resultierenden Cluster nicht Voxel, sondern Unterschiede von Vertices (Fläche) der GM zwischen den Gruppen beschreiben.

In Abbildung 15 sind die einzelnen Schritte sowohl für die VBM wie auch die SBM differenziert dargestellt.

Ergebnisse

Verhaltensdaten. Zur Beschreibung der Gruppen wurde einerseits das Arbeitsgedächtnis und andererseits der IQ erfasst und analysiert, inwiefern sich DD und KG in diesen beiden Variablen unterscheiden. Die DD erreichten im Corsi-Block-Suppression-Test, der die Arbeitsgedächtnisleistung repräsentiert, einen mittleren Wert von $M = 5.55$ ($SD = 1.99$), die KG von $M = 6.35$ ($SD = 2.33$). Der Mann-Whitney-U-Test zeigte, dass dieser Unterschied nicht signifikant ist (Mann-Whitney-U-Test: $U = 261.50$, $p = .178$). Hinsichtlich des allgemeinen kognitiven Leistungsniveaus zeigte die KG einen mittleren IQ-Wert von $M = 111.59$ ($SD = 5.73$) während die DD einen IQ von $M = 99.42$ ($SD = 7.41$) erreichten. Dieser Wert fiel, wie bereits erwähnt, signifikant (Mann-Whitney-U-Test: $U = 73.50$, $p < .001$) und mit einer starken Effektstärke ($r = .67$) aus. Jedoch soll nochmals betont werden, dass alle Vpn, um überhaupt an der Studie teilnehmen zu können, über einen IQ im Normbereich verfügen mussten.

Voxelbasierte Morphometrie. Die Ergebnisse der VBM-Analyse sind in Tabelle 9 und in Abbildung 16 ersichtlich. Für die Analyse wurde ein Signifikanzkriterium von $p < .001$ verwendet und anhand eines cluster-extent threshold von $k \geq 46$ Voxels für multiple Vergleiche korrigiert.

Bezüglich des Volumens der GM zeigte sich, dass die beobachteten signifikanten Gruppenunterschiede ausschliesslich auf ein kleineres Volumen der GM bei den DD zurückgeführt werden konnte. Dabei wiesen die DD ein kleineres Volumen im links- und rechtsseitigen Insulalappen, dem linksseitigen superioren Parietallappen und medialen Temporalpol sowie dem rechtsseitigen medialen Gyrus frontalis und inferioren Gyrus temporalis auf. Für ein signifikant unterschiedliches Cluster konnte keine eindeutige anatomische Zuordnung erfolgen. Bei genauerer Betrachtung wurde ersichtlich, dass das Cluster an den linksseitigen Insulalappen grenzt. Die grössten Cluster zeigten sich für die Insula und den superioren Parietallappen.

Wurden die Analysen mit der IQ-Kovariate gerechnet, zeigte sich, dass die DD ein grösseres Volumen im rechtsseitigen Cerebellum und dem visuellen Kortex sowie einem Gehirnnareal angrenzend an den rechten Gyrus cinguli posterior aufwiesen als die KG. Kleinere Volumen zeigten sich in den gleichen Gehirnnarealen wie jenen, die ohne IQ-Kovariate berechnet wurden. Zusätzlich fielen jedoch verschiedene weitere Cluster zwischen den Gruppen signifikant aus. Auf der linken Hemisphäre waren dies die Amygdala, der Gyrus parahippocampus, der entorhinale Kortex (Gyrus fusiformis), das Cerebellum, der Gyrus orbitofrontalis sowie das Operculum. Auf der rechten Hemisphäre wurden signifikante Cluster des inferioren Parietallappens (Gyrus supramarginalis), Gyrus okzipitalis superior und media, Gyrus postcentralis, Gyrus frontalis media, Gyrus präcentralis sowie des Putamens gefunden.

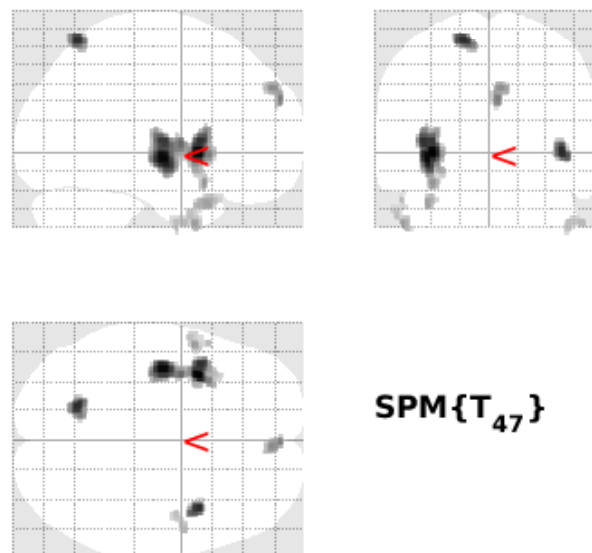


Abbildung 16. Ergebnisse der VBM-Analyse. Zu sehen sind die Gehirnlokalisationen der Cluster, in denen die DD im Vergleich zur KG signifikant weniger Volumen der GM aufweisen ($p < .001$, $k \geq 46$).

Oberflächenbasierte Morphometrie. Die Ergebnisse der SBM-Analyse sind ebenfalls in Tabelle 9 aufgeführt und in Abbildung 17 ersichtlich. Wie bei der VBM wurde bei der SBM ein Signifikanzkriterium von $p < .001$ verwendet und anhand eines cluster-extent threshold von $k \geq 41$ Vertices für die sulcale Tiefe, $k \geq 33$ Vertices für die kortikale Oberflächenkomplexität, $k \geq 50$ Vertices für die Gyriifikation sowie $k \geq 32$ Vertices für die kortikale Dicke für multiple Vergleiche korrigiert. Dabei zeigten sich kleinere Werte der

sulcalen Tiefe im rechts- und linksseitigen Insulalappen, Gyrus okzipitalis media, Gyrus cinguli media, Gyrus cinguli anterior, Gyrus paracinguli, Gyrus postcentralis, im linksseitigen Gyrus frontalis superior und Gyrus temporalis media sowie im rechtsseitigen Sulcus corporis callosi (Balkenfurche) bei den DD im Gegensatz zur KG. Hinsichtlich der Oberflächenkomplexität resultierten kleinere Werte bei den DD als bei der KG für den linksseitigen Temporalpol und den posterioren medialen Frontalkortex. Die Kennwerte der Gyrifikation und kortikalen Dicke wiesen keine signifikanten Unterschiede auf.

Wurden die Ergebnisse mit IQ-Kovariate berechnet, unterschieden sich die Gruppen in weniger Clustern. Hinsichtlich der sulcalen Tiefe waren dies Gebiete im links- und rechtsseitigen Gyrus temporalis media, im linksseitigen superioren und posterioren Parietallappen sowie der Insula und im rechtsseitigen Gyrus okzipitalis media. Bezüglich der kortikalen Oberflächenkomplexität resultierten Cluster im linksseitigen Gyrus temporalis media, im Temporalpol sowie im Precuneus. Der Kennwert der Gyrifikation wies ebenfalls keine signifikanten Unterschiede der Gehirnregionen zwischen den Gruppen auf. Jedoch resultierte eine grössere kortikale Dicke des linksseitigen Gyrus frontalis superior bei den DD im Vergleich zur KG.

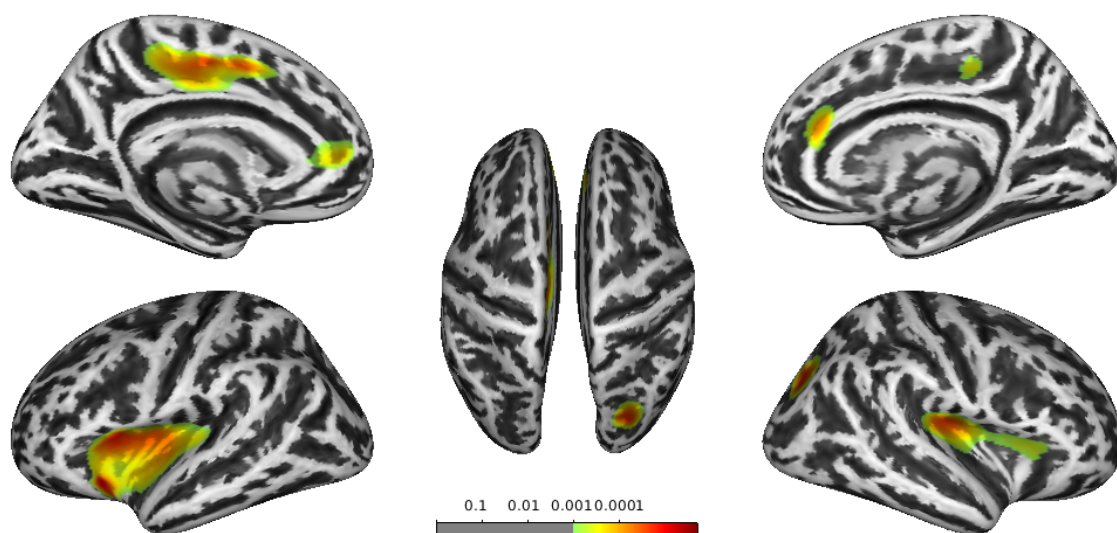


Abbildung 17. Ergebnisse der SBM-Analyse. Zu sehen sind die Gehirnlokalisationen der Cluster, in denen die DD im Vergleich zur KG signifikant weniger tiefe Sulci aufweisen.

Tabelle 9

Ergebnisse der VBM- und SBM-Analyse

| Kennwert | Kontrast | Gehirnregion | Clustergrösse | Peak t-Wert | Peak MNI-Koordinaten | | |
|------------------------|----------|---|---------------|-------------|----------------------|-----|-----|
| | | | | | x | y | z |
| Volumen GM | DD > KG | - | - | - | - | - | - |
| | DD < KG | L Insulalappen | 1302 | 4.81 | -34 | 8 | -2 |
| | | | | 4.72 | -39 | -14 | -4 |
| | | | | 4.45 | -40 | 8 | 4 |
| | | L superiorer Parietallappen | 180 | 4.46 | -16 | -64 | 63 |
| | | R Insulalappen | 136 | 4.48 | 40 | 8 | -2 |
| | | R medialer Gyrus frontalis | 130 | 3.92 | 3 | 56 | 28 |
| | | | | 3.82 | 4 | 51 | 36 |
| | | L medialer Temporalpol | 85 | 3.72 | -52 | 4 | -42 |
| | | | | 3.54 | -54 | 14 | -28 |
| | | | | 3.32 | -57 | 8 | -33 |
| | | L medialer Temporalpol | 78 | 3.69 | -39 | 12 | -30 |
| | | R inferiorer Gyrus temporalis | 51 | 3.53 | 54 | 0 | -42 |
| | | | | 3.51 | 45 | -4 | -42 |
| | | NB; L angrenzend an Insula | 50 | 3.76 | -34 | 10 | -18 |
| Sulcale Tiefe | DD > KG | - | - | - | - | - | - |
| | DD < KG | L Insulalappen | 1503 | 4.86 | -30 | 16 | -12 |
| | | | | 4.65 | -30 | 14 | 13 |
| | | | | 4.41 | -38 | -6 | 9 |
| | | R Gyrus okzipitalis media | 246 | 4.57 | 30 | -73 | 22 |
| | | R Insulalappen | 802 | 4.49 | 34 | -21 | 15 |
| | | | | 3.62 | 32 | 20 | 9 |
| | | L Gyrus cinguli media und Gyrus paracinguli | 661 | 4.46 | -12 | -16 | 44 |
| | | | | 4.4 | -10 | 3 | 43 |
| | | R Gyrus cinguli anterior und paracinguli | 109 | 4.19 | 4 | 38 | 14 |
| | | L Gyrus frontalis superior | 44 | 4.06 | -27 | 55 | 1 |
| | | R Gyrus postcentralis | 70 | 3.95 | 44 | -15 | 37 |
| | | L Gyrus cinguli anterior und paracinguli | 116 | 3.94 | -3 | 45 | 3 |
| | | L Gyrus postcentralis | 94 | 3.77 | -42 | -20 | 38 |
| | | R Gyrus cinguli media und Gyrus paracinguli | 58 | 3.69 | 12 | -33 | 42 |
| | | L Gyrus temporalis media | 64 | 3.64 | -50 | -25 | -5 |
| Oberflächenkomplexität | DD > KG | - | - | - | - | - | - |
| | DD < KG | L Temporalpol | 51 | 3.95 | -42 | 12 | -22 |
| | | L posteriorer medialer Fronalkortex | 54 | 3.94 | -5 | 24 | 49 |
| | | | | | | | |
| Gyrifikation | DD > KG | - | - | - | - | - | - |
| | DD < KG | - | - | - | - | - | - |
| Kortikale Dicke | DD > KG | - | - | - | - | - | - |
| | DD < KG | - | - | - | - | - | - |

Anmerkungen. Ersichtlich sind die Ergebnisse für die verschiedenen Kennwerte (Gehirnmasse) und die berechneten Kontraste der VBM. Für jede Analyse werden die signifikant unterschiedlichen Cluster zwischen den Gruppen anhand der t-Werte, MNI-Koordinaten und zusammengefassten anatomischen Zuordnungen angegeben. Für das Volumen wurde ein extent threshold (k) von $k = 45$ Voxeln, für die sulcale Tiefe von $k = 41$, für die kortikale Oberflächenkomplexität von $k = 33$, für die Gyrifikation von $k = 50$ und für die kortikale Dicke von $k = 32$ Vertices verwendet. Das gewählte Signifikanzniveau beträgt $< .001$. DD = Dyskalkuliker; KG = Kontrollgruppe; L = linksseitige Hemisphäre; R = rechtsseitige Hemisphäre; NB = nicht eindeutig bestimmbar.

Diskussion

Untersucht wurden mögliche Unterschiede der Gehirnstruktur zwischen Kindern und Jugendlichen mit und ohne Dyskalkulie. Da das Volumen der GM bereits vorgängig mehrfach untersucht wurde, stellte die VBM-Analyse eine Replikation dar. Die Analyse der SBM hingegen hatte zum Ziel, erste Kenntnisse über kortikale Oberflächenmerkmale bei Kindern und Jugendlichen mit Dyskalkulie zu erlangen. Der Vergleich der Ergebnisse mit einer IQ-Kovariate hat gezeigt, dass signifikante Volumenunterschiede der GM weiter

verteilt über das gesamte Gehirn liegen, während die Unterschiede der Oberflächenmerkmale mit Einschluss der IQ-Kovariate auf weniger Orte beschränkt beobachtet wurden. Der IQ scheint folglich einen Einfluss auf die Ergebnisse zu nehmen, wobei unklar bleibt, inwiefern er mit der Mathematikleistung korreliert. Aufgrund der erwähnten Annahme, dass mit der Kontrolle des IQ auch ein Teil der Mathematikleistung herauspartialisiert wird (Dennis et al., 2009), wurde entschieden, die Analysen ohne IQ-Kovariate zu berechnen. Folgend werden deshalb ausschliessend die Ergebnisse, die ohne IQ-Kovariate resultierten, diskutiert.

Volumen der grauen Substanz. Bei der Untersuchung des Volumens der GM hat sich gezeigt, dass bei Kindern mit Dyskalkulie im Vergleich zur KG einige Hirngebiete ein kleineres Volumen aufweisen. Dazu gehören die Insula bilateral, der linksseitige superiore Parietallappen und mediale Temporalpol, der rechtsseitige mediale Gyrus frontalis und der rechtsseitige Gyrus temporalis inferior. Die Hypothese kann folglich angenommen werden. Diese Ergebnisse stimmen mit anderen Studien überein, welche Kinder mit Dyskalkulie untersucht haben. Diese Studien berichten über ein kleineres Volumen der GM im superioren Parietallappen, jedoch vermehrt bilateral oder rechtsseitig (McCaskey et al., 2020; Ranpura et al., 2013; Rotzer et al., 2008; Rykhlevskaia et al., 2009). Dieses Hirngebiet scheint einen konsistenten Zusammenhang mit Rechenstörungen aufzuweisen und wird aufgrund von Resultaten funktioneller Studien als eines der wichtigsten Hirngebiete für die Zahlenverarbeitung und Mengenrepräsentation aufgefasst (Sokolowski, Fias, Bosah Ononye & Ansari, 2017). Allerdings hat sich im Vergleich zu den erwähnten Studien keine Veränderung des IPS gezeigt. Übereinstimmend mit der Studie von McCaskey et al. (2020), resultierten klare Volumenminderungen in der bilateralen Insula. Die Rolle der Insula scheint vielseitig und nicht vollständig geklärt zu sein. Hinsichtlich der mathematischen Fertigkeiten wird vermutet, dass die Insula in Bezug zu Aufmerksamkeitsfunktionen steht und eine allgemeine Rolle hinsichtlich der numerischen Kognition sowie bei Entscheidungsverhalten einnimmt (Arsalidou & Taylor, 2011). Zudem wird sie in Zusammenhang mit Mathematikangst (Lyons & Beilock, 2012) sowie mit komplexen Interaktionen zwischen Kognition, Emotion und Interozeption (Uddin, 2014) gebracht. Eine Volumenminderung im inferioren Gyrus temporalis fanden McCaskey et al. (2020), jedoch bilateral. Dieser enthält neuroanatomische Strukturen, welche der Prozessierung visueller Informationen dienen und beim Decodieren der Zahlenform beteiligt sind (Arsalidou & Taylor, 2011). Auch Ranpura et al. (2013) und Rykhlevskaia et al. (2009) berichteten temporale Volumenminderungen, jedoch in anderen Regionen des Temporallappens. Von Unterschieden des linksseitigen

medialen Temporalpols zwischen Kinder mit und ohne Dyskalkulie wird in keiner der Studien berichtet. Dabei scheint die Funktion des medialen Temporalpols eher in Bezug zur sprachlichen Domäne zu stehen (Dupont, 2002). Dupont (2002) fasst zusammen, dass der Temporalpol in Bezug auf das autobiografische Gedächtnis, auf Lernprozesse sowie zur linguistischen Integration lexikalischer und semantischer Verbindungen mit unterschiedlichen Wörtern beschrieben wird. Dies könnte bedeuten, dass DD auch in der sprachlichen Verarbeitung Auffälligkeiten aufweisen respektive die Beteiligung sprachlicher Aspekte beim Rechnen und der Zahlenverarbeitung ersichtlich werden, wie dies beispielsweise anhand einer mangelnden Merkleistung durch subvokales Wiederholen von Gedächtnisinhalten beobachtet wurde (Landerl, Volgel et al., 2017). Zudem könnte sich die Überlappung mit der sprachlichen Domäne bei den DD auch anhand von vermehrten Komorbiditäten mit LRS erklären lassen. Ein vermindertes Volumen im medialen Gyrus frontalis wurde in den anderen Studien ebenfalls nicht berichtet. Der mediale Gyrus frontalis ist einer von zwei Gyri des Frontallappens und wird in Verbindung mit hohen exekutiven Funktionen sowie Entscheidungsprozessen gebracht (Talati & Hirsch, 2005). Diese Beobachtung könnte einerseits auf Komorbiditäten mit AD(H)S hinweisen oder mit den bei DD typischerweise berichteten mangelhaften Inhibitionsprozessen in Beziehung stehen (Passolunghi et al., 2005). Im Vergleich zu den anderen Studien wurden keine okzipitalen und hippocampalen Hirnveränderungen beobachtet.

Untersuchungen an Kindern ohne Dyskalkulie, die eine typische Entwicklung aufweisen, zeigten auf, dass das Volumen der GM verschiedener Teile des arithmetischen Netzwerks (posterior parietale Gebiete und ventraler okzipito-temporaler Kortex) den Zuwachs arithmetischer Leistungen erklären konnte (Evans et al., 2015). Diese Daten weisen darauf hin, dass die strukturelle Integrität verschiedener Teile des arithmetischen Netzwerks mit der arithmetischen Leistung in Verbindung stehen.

Kortikale Oberflächenmerkmale. Die Analyse der SBM hat Unterschiede zwischen DD und typisch entwickelten Kindern hinsichtlich der sulcalen Tiefe und der Oberflächenkomplexität gezeigt. Die Sulci waren bei den DD weniger tief und die Oberflächenkomplexität weniger ausgeprägt. Keine Unterschiede konnten bezüglich kortikaler Dicke und der Gyrfikation gemessen werden. Die signifikant unterschiedlichen Hirnregionen, in Bezug auf die sulcale Tiefe, fanden sich in der bilateralen Insula, dem bilateralen Gyrus okzipitalis media, Gyrus cinguli media, Gyrus paracinguli, Gyrus cinguli anterior und Gyrus postcentralis, dem linksseitigen Gyrus temporalis media und Gyrus

frontalis superior sowie in der Balkenfurche. Die kortikale Oberflächenkomplexität zeigte signifikante Gruppenunterschiede im linksseitigen Temporalpol sowie dem posterioren medialen Frontalkortex. Weil keine früheren Studien kortikale Oberflächenmerkmale bei Kindern mit Dyskalkulie untersucht haben, können die Ergebnisse nicht direkt verglichen werden. Die einzige Untersuchung, so weit bekannt, welche kortikale Oberflächenmerkmale bei typisch entwickelten Kindern in Bezug auf die mathematische Leistungsfähigkeit analysierte, führten Polspoel, Vandermosten und De Smedt (2020) durch. Sie konnten keine Zusammenhänge zu typischerweise berichteten Hirngebieten in Bezug auf die Mathematikleistung aufzeigen, jedoch zwischen der Mathematikleistung und der Oberflächenkomplexität des linksseitigen Gyrus postcentralis und Sulcus orbitalis sowie des rechtsseitigen Sulcus insularis. Damit stimmen die Ergebnisse mit der vorliegenden Studie bezüglich des linksseitigen Gyrus postcentralis sowie der rechten Insula überein. Der Gyrus postcentralis liegt auf dem Parietallappen des Grosshirns und enthält den somatosensorischen Kortex, in dem sensorische Empfindungen des Körpers unmittelbar verarbeitet werden (Jäncke, 2017). Kaufmann (2008) brachte postcentrale Aktivierungen mit nonsymbolischer numerischer sowie räumlicher Verarbeitung in Verbindung. Des Weiteren konnten Zusammenhänge zwischen der prä- sowie postcentralen Aktivierung und der Anwendung von arithmetischen Strategien (Subvokalisierung, Fingerzählen) aufgezeigt werden (Kesler, Menon & Reiss, 2006). Heidekum, Vogel und Grabner (2020) haben die Oberflächenkomplexität, kortikale Dicke, sulcale Tiefe und Gyrifikation von erwachsenen typisch entwickelte Vpn im Zusammenhang mit deren mathematischen Leistungsfähigkeit untersucht. Auch bei ihnen zeigten sich Unterschiede in der kortikalen Oberflächenkomplexität und der sulcalen Tiefe, während die Gyrifikation sowie kortikale Dicke keine Abweichungen zeigten. In ihrer Studie resultierte ein Zusammenhang zwischen der kortikalen Oberflächenkomplexität des rechtsseitigen Gyrus temporalis superior und der numerischen Intelligenz sowie zwischen der sulcalen Tiefe des linksseitigen centralen Sulcus und des parieto-okzipitalen Sulcus und der Mathematikleistung. Hierbei bestehen Überschneidungen der Ergebnisse folglich hauptsächlich im Gyrus temporalis. Der Gyrus temporalis inferior steht in Bezug zur Prozessierung visueller Informationen (Arsalidou & Taylor, 2011), während die Funktion des Gyrus temporalis media noch weitgehend unbekannt ist, jedoch in Zusammenhang mit der Gesichtserkennung (Cunningham, Arbuckle, Jahn, Mowrer & Abduljalil, 2011) und dem Lesen (Shaywitz et al., 2004) gebracht wurde. Moreau et al. (2019) schliesslich untersuchten erwachsene Personen mit und ohne

Dyskalkulie anhand der SBM hinsichtlich möglicher Unterschiede der kortikalen Dicke, kortikalen Oberflächenkomplexität, Gyriifikation sowie sulcalen Tiefe. In ihrer Studie liessen sich im Gegensatz zur vorliegenden Untersuchung keine Unterschiede zwischen den Gruppen aufzeigen. Es stellt sich die Frage, ob keine Unterschiede vorhanden waren oder ob sich diese möglicherweise über die Entwicklung hinweg abgeschwächt haben. Denn wie Drechsler & Günther (2018) beschreiben, zeigen sich bei Kindern andere Entwicklungsverläufe bei vorhandenen Hirnschädigungen als bei Erwachsenen. Die einzige Langzeitstudie, welche den Entwicklungsverlauf der Dyskalkulie untersucht hat, kommt zum Schluss, dass die Entwicklung der Kinder mit und ohne Dyskalkulie ähnlich voranschreitet, jedoch bleiben die Gruppenunterschiede über die Zeit stabil bestehen (McCaskey et al., 2020). Moreau et al. (2019) interpretierten ihre Nullergebnisse bei Erwachsenen so, dass sich Unterschiede der GM hinsichtlich des Störungsbildes der Dyskalkulie wohl nicht derart verlässlich zeigen würden, wie bis anhin erwartet. Jedoch betonten sie, dass diese Ergebnisse nicht zwingend bedeuten, dass keine neuroanatomischen Veränderungen bei Erwachsenen mit Dyskalkulie vorhanden sind, sondern dass diese viel diffuser vorliegen könnten, als dies bei Kindern beobachtet wird, was eine exakte Messung erschwert. In diesem Zusammenhang muss erwähnt werden, dass die Vpn in der vorliegenden Studie eine grosse Altersspanne von acht Jahren aufwiesen (Altersspanne: 11.6 bis 19.6 Jahre). Falls sich kortikale Unterschiede bis zum Erwachsenenalter abschwächen oder verschwinden, könnte es sein, dass in der Studie mit jüngeren Kindern und einer begrenzteren Altersspanne deutlichere Ergebnisse resultiert wären.

Anhand der SBM ist es zwar nicht möglich, direkte Bezüge zu lokalen Gehirnfunktionen herzustellen, jedoch wird davon ausgegangen, dass einige dieser Gehirnregionen hinsichtlich des mathematischen Denkens eine Rolle spielen dürften. Folglich wurden Vermutungen über Verbindungen zwischen funktionalen Eigenschaften und kortikalen Regionen geäussert (Moeller et al., 2017). Überrascht hat, dass keine der ansonsten häufig berichteten Hirnregionen wie der IPS in Bezug auf die Mathematikleistung (McCaskey et al., 2020; Ranpura et al., 2013; Rotzer et al., 2008; Rykhlevskaia et al., 2009) gefunden wurden. Darüber, welche Bedeutung die weiteren Befunde haben, kann nur spekuliert werden. Der superiore Gyrus frontalis ist dafür bekannt, an visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnis- sowie Überwachungsaufgaben beteiligt zu sein und wird in Zusammenhang mit zielgerichtetem Verhalten gebracht (Arsalidou & Taylor, 2011). Veränderungen des linken okzipito-temporalen Kortex wurden bei DD im Vergleich zu

Kindern aus der KG aufgezeigt (Han et al., 2013). Dabei scheint der Gyrus okzipitalis media Teil des visuellen Systems höherer Ordnung zu sein und dessen Beteiligung wurde beispielsweise bei mentalen Rotationsaufgaben je nach Art der visuellen Stimuli berichtet (McCaskey et al., 2017; Roggeman, Santes, Fias & Verguts, 2011). Der Gyrus cinguli ist Teil des limbischen Systems und wird in Verbindung mit Emotionen und Gedächtniskontrolle gebracht. Das anteriore Cingulum ist eingebunden in Aufgaben, die Entscheidungen oder Handlungen erfordern und zeigt eine stärkere Aktivierung, je schwieriger die Aufgaben ausfallen (Jäncke, 2017). Im Bereich des Gyrus cinguli haben sich einige signifikant unterschiedliche Cluster hinsichtlich der sulcalen Tiefe gezeigt. Möglicherweise nimmt dieses Hirngebiet, aufgrund seiner Verbindung zwischen dem Frontal- und Parietallappen sowie den Verbindungen zum Gyrus parahippocampalis und zum Temporallappen, eine bedeutsame Rolle ein. Das anteriore Cingulum wie auch der mediale Frontalkortex zeigten in der Studie von Rotzer et al. (2008) ein vermindertes Volumen der GM bei Kindern mit Dyskalkulie. Sie brachten die Ergebnisse in einen möglichen Zusammenhang mit subklinischen Beeinträchtigungen des Aufmerksamkeits- und Arbeitsgedächtnissystems, was einen negativen Effekt auf den Erwerb von numerischen Repräsentationen sowie der Zahlenverarbeitungskapazität ausüben könnte. Seitz (2011) beschreibt den medialen Frontalkortex, nebst dem internen Generieren von Handlungen, als wesentlich für die Verhaltenskontrolle sowie für kognitive und emotionale Vorgänge. Schliesslich resultierte der Sulcus corporis callosi (Balkenfurche) bei den DD mit einer verminderten sulcalen Tiefe. Der Sulcus des Corpus callosum liegt zwischen dem Gyrus cinguli und dem Corpus callosum. Das Corpus callosum ist eine querverlaufende Faserverbindung, welche die beiden Hemisphären miteinander verbindet und hat die Aufgabe, Informationen von einer Hemisphäre zur anderen zu bringen. Dabei scheint es in Verbindung mit verschiedenen kognitiven Funktionen zu stehen. Welche Informationen genau übertragen werden, ist jedoch noch nicht geklärt (Jäncke, 2017).

Insgesamt kann gesagt werden, dass Kennwerte wie die kortikale Oberflächenkomplexität bisher erfolgreich für die Untersuchung altersbezogener Unterschiede der Gehirnstruktur (Madan & Kensinger, 2016) sowie zur Prüfung von Unterschieden kognitiver Funktionen (Sandu et al., 2014) eingesetzt wurden. Mit Hilfe der sulcalen Tiefe wurden zudem neuroanatomische Korrelate verschiedenster kognitiver Mechanismen analysiert. Beispielsweise steht die Beschaffenheit der Sulci in Zusammenhang mit der individuellen Intelligenz (Yang et al., 2013) respektive werden Abweichungen

spezifischer Sulci mit atypischen Entwicklungen bei DD (zum Beispiel Rotzer et al., 2008) oder Personen mit LRS (zum Beispiel Richlan, Kronbichler & Wimmer, 2013) berichtet. Zukünftige Studien zur Untersuchung von Kindern mit Dyskalkulie sollten deshalb nebst der VBM- auch die SBM-Analyse einsetzen. Denn gegenüber der VBM zeigt die SBM einige Vorteile auf. Die Normalisierung kann exakter vorgenommen und weitere Kennwerte wie die sulcale Tiefe berechnet werden (Dahnke et al., 2013). Das bedeutet, dass mit dieser Methode feinere Unterschiede entdeckt werden können.

Entwicklungsbedingte Veränderungen. Um herauszufinden, ob solche neuronalen Abweichungen Ursache oder Folge der Dyskalkulie sind, braucht es zwingend Längsschnittstudien. Dabei geht die Untersuchung von Kindern und Jugendlichen, wie bereits beschrieben, mit einigen Besonderheiten einher. Ein wichtiger Faktor, der stets Beachtung finden sollte, ist die Entwicklung. Entwicklungsveränderungen äussern sich, indem verschiedene Aufgabenarten je nach Alter mit verschiedenen Strategien gelöst werden, was wiederum zu Veränderungen der Gehirnstruktur und –funktion führt (Peters & De Smedt, 2018). Soll Entwicklung wirklich verstanden werden, muss auf kleine Altersspannen zurückgegriffen werden (Peters & De Smedt, 2018). Denn Interventionen und voranschreitende Bildung könnten schon in kleinen Mengen neuronale Veränderungen hervorrufen. Zudem kann, indem die untersuchten Gruppen hinsichtlich ihres Fertigungslevels aufeinander angepasst werden, der Einfluss der Erfahrung im Vergleich zu angeborenen Ursachen eingeschätzt werden (De Smedt et al., 2019). Einflüsse aufgrund der Erfahrung wurden beispielsweise bei LRS berichtet (Norton, Beach & Gabrieli, 2015). Solche Untersuchungen könnten weitere Kenntnisse zur erfahrungsabhängigen Plastizität bei Dyskalkulie bringen. Rosenberg-Lee et al. (2015) haben aufgezeigt, dass im Laufe der Entwicklung eine Aktivitätsverschiebung von weitverbreiteten zu spezifischen funktionellen Netzwerken stattfindet, was als reifungsbedingte Veränderungen angesehen werden kann. Dies weist darauf hin, dass sich die Entwicklung neuronaler Netzwerke allmählich über die Zeit ereignet. Insofern stellt insbesondere bei Kindern und Jugendlichen eine Untersuchung eine Momentaufnahme dar.

Limitierungen und Stärken. Einige Limitierungen aber auch Stärken der MRT-Studie sollen abschliessend geäussert werden. Ein grosser Nachteil besteht in der Durchführung eines Querschnittstudiendesigns. Dies erlaubt es nicht, Aussagen zur Kausalität zu machen oder Entwicklungsverläufe aufzuzeigen (Döring et al., 2016). Damit bleibt die Frage offen, ob die neuronalen Veränderungen angeboren sind und schon vor der

Beschulung und damit dem Rechnenlernen vorhanden waren. Ein Problem der VBM-Analyse ist, dass viele Einstellungen (zum Beispiel unterschiedliche Vorverarbeitungsschritte) vorgenommen werden können, was die Vergleichbarkeit zu Studien, welche andere analytische Methoden wählten, erschwert. Des Weiteren zeigte sich die Bildqualität aufgrund von Artefakten (zum Beispiel aufgrund von Zahnsparungen oder Bewegungen) bei einigen MRT-Bildern als schlecht und diese Personen mussten ausgeschlossen werden. Dies könnte zu einer systematischen Verzerrung geführt haben, indem Ausschlüsse nicht mehr auf den Zufall zurückzuführen sind. So ist es möglich, dass beispielsweise Kinder mit Dyskalkulie und AD(H)S mehr Bewegung zeigten und deshalb nicht in der Stichprobe eingeschlossen wurden. Die grosse Altersspanne dürfte zudem zu einer grossen Heterogenität der Ergebnisse geführt haben, weshalb diese vorsichtig interpretiert werden müssen. Bei Kindern findet die kortikale Entwicklung reifungsbedingt statt, was spontane Veränderungen aufgrund des Entwicklungsverlaufs hervorruft (Houston et al., 2013). Damit ist es schwierig, auf die Ursache von Veränderungen schliessen zu können. Zudem ist es kaum möglich zu kontrollieren, welche Kinder in den vergangenen Jahren in welchem Ausmass Mathematiknachhilfeunterricht besuchten oder andere Interventionen durchliefen. Diese Tatsache jedoch dürfte sich ebenfalls auf die Ergebnisse auswirken und zu Verzerrungen führen. Zudem müsste berücksichtigt werden, dass die Gehirnentwicklung in der Pubertät bei Mädchen und Jungen unterschiedlich verläuft (Blakemore, Burnett & Dahl, 2010). Um dieser Tatsache gerecht zu werden, sollte anhand eines Pubertätsfragebogens die Entwicklung abgefragt und somit berücksichtigt werden. Dies war aufgrund fehlender Daten leider nicht möglich. Dass die Vpn aus verschiedenen Studien stammten und deshalb mit teilweise verschiedenen IQ-Tests von verschiedenen Testleitern untersucht wurden, macht eine Vergleichbarkeit schwierig. Jedoch wurden die Gruppen hinsichtlich verschiedener Verhaltensmerkmale verglichen und haben sich, bis auf den IQ, nicht unterschieden. Die Frage nach der Kontrolle des signifikant unterschiedlichen IQ zwischen den Gruppen wurde bereits diskutiert. Dieser scheint zum Störungsbild der Dyskalkulie dazugehören und sollte nicht herauspartialisiert werden sondern als Bestandteil des Störungsbildes Beachtung finden. Insgesamt wurden verhältnismässig viele Mädchen und wenige Jungen aus verschiedenen Klassenstufen aus der Schweiz in die Stichprobe eingeschlossen, was keine Generalisierbarkeit der Ergebnisse auf die allgemeine Bevölkerung und auch nicht auf DD im Spezifischen erlaubt. Zudem darf nicht vergessen werden, dass die Ergebnisse einer Untersuchung zwischen Gruppen nicht direkt auf das Individuum übertragen und subtile

Gehirnunterschiede nicht zwingen bei einzelnen Personen nachgewiesen werden können (De Smedt et al., 2019).

Eine der Stärken der Studie zeigt sich, im Vergleich zu vorgängigen Untersuchungen, in der relativ grossen Anzahl an Vpn, die für die Analyse eingeschlossen wurden. Zudem wurde mit der Durchführung der SBM-Analyse eine verfeinerte Analysemethode angewendet, die nebst der VBM-Analyse aus bereits genannten Gründen auch zukünftig verwendet werden sollte. Studien zur Hirnstruktur von Kindern und Jugendlichen mit Dyskalkulie sind zudem wenig vorhanden, weshalb die vorliegende Untersuchung einen weiteren Beitrag zu den Kenntnissen der neurobiologischen Grundlagen des Störungsbildes der Dyskalkulie leistet.

Schlussfolgerungen und Fazit. Die Ergebnisse der Studie zeigen auf, dass nebst dem Volumen der GM Unterschiede der oberflächenbasierten Merkmale des Kortex zwischen Kindern mit und ohne Dyskalkulie vorhanden sind. Eine verringerte GM resultierte bei den DD in der Insula sowie in parietalen, temporalen und frontalen Hirngebieten. Weniger tiefe Sulci wurden in der Insula, in okzipitalen, temporalen und frontalen Gebieten, dem Gyrus cinguli und paracinguli sowie der Balkenfurche beobachtet. Zudem zeigte sich eine reduzierte kortikale Oberflächenkomplexität bei den DD in temporalen und frontalen Hirngebieten. Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass in Zukunft weitere strukturelle Charakteristika bei Dyskalkulie untersucht werden sollten, um das Wissen zu erweitern. Geht man davon aus, dass anhand der Hirnstrukturen, hinsichtlich derer sich die DD von der KG unterscheiden haben, auf spezifische Funktionen geschlossen werden kann, dann deuten die Ergebnisse der Studie auf einige domänenspezifische und vielmehr auf domänenübergreifende Beeinträchtigungen hin. Dies könnte ein Hinweis sein, dass der Wechsel von frontalen zu parietalen Gehirngebieten, welcher sich in der mathematischen Entwicklung ereignet, mit zunehmender Automatisierung einhergeht und bei fMRT-Untersuchungen aufgezeigt wurde (Rosenberg-Lee et al., 2015), noch nicht stattgefunden hat. Es kann auch sein, dass die Entwicklung der Hirnstruktur einen anderen Verlauf aufzeigt. Diese Frage kann nur anhand von Langzeitstudien, vorzugsweise mit einer kleinen Altersspanne, geklärt werden, die sowohl domänenspezifische wie auch domänenübergreifende Faktoren einschliessen. In Anbetracht des weit verbreiteten neuronalen Netzwerkes, das beim Rechnen und der Zahlenverarbeitung eingebunden ist, sollten in zukünftigen Untersuchungen zudem nicht nur auf die bekannten parietalen Hirnregionen fokussiert, sondern das Augenmerk auf das gesamte Gehirn gerichtet werden.

Gesamtdiskussion

Die beiden durchgeführten Studien führten jeweils zu Ergebnissen, die teilweise mit der vorhandenen Studienlage übereinstimmen, aber auch davon abweichen und neue Fragen aufwerfen. Beim Vergleich von verschiedenen Studien, welche sich mit DD befassen, fällt auf, dass deren Ergebnisse und Schlussfolgerungen häufig sehr heterogen ausfallen. Dies erschwert das Verständnis und die Interpretationen. Solch uneinheitliche Befunde können nicht nur mit dem heterogenen Störungsbild, sondern auch mit dem unterschiedlichen methodischen Vorgehen erklärt werden. Verschiedene Studien wählten vielfältige Mathematikaufgaben, welche unterschiedliche Anforderungen mit sich brachten und eine spezifische Verarbeitung zur Folge hatten. Zudem wird die Mathematikleistung je nach Studie unterschiedlich gemessen. Nicht alle Aufgaben des gleichen Typs werden mit der gleichen Strategie gelöst, was bei Mittelung der Ergebnisse, ohne Einbezug der angewendeten Rechenstrategie, zu falschen Schlussfolgerungen führen könnte (Siegler, 1989). Gerade bei atypischen Populationen wie den DD könnte, abhängig von Alter, Bildung und Fertigungslevel, vermehrt ein Strategiemix beobachtet werden. Deshalb sprechen sich Peters und De Smedt (2018) dafür aus, dass bei der Untersuchung von Kindern ein verbaler Bericht über die verwendeten Lösungsstrategien erhoben werden sollte. Denn je nach Aufgabenart kann eine andere Strategie eingesetzt werden und diese wiederum dürfte mit dem Alter respektive dem Bildungslevel zusammenhängen. Auch in der durchgeführten Verhaltensstudie hat sich klar gezeigt, dass DD weniger effiziente Rechenstrategien anwenden können. Dabei leisten Tests wie der BM 4-8, welche das Vorgehen beim Lösen von Rechenaufgaben mitberücksichtigen, wertvolle Informationen bei der Diagnosestellung und für mögliche Interventionen. Um die Vergleichbarkeit bei Untersuchungen zu erhöhen, sollten nur Stichproben mit einer kleinen Altersspanne untersucht werden. Ein weiterer Punkt ist der Einfluss durch Umweltfaktoren. Dabei beeinflussen sowohl die häusliche und familiäre wie auch die schulische Umgebung die mathematische Entwicklung und damit deren zugrundeliegende Gehirnentwicklung (Anders et al., 2012). Insgesamt stellt der Zusammenhang verschiedener Faktoren mit der Dyskalkulie eine grosse Herausforderung sowohl für die Praxis als auch die Forschung dar, was Interpretationen erschwert. Dazu gehören die erwähnten häufigen Komorbiditäten mit AD(H)S (Czamara et al., 2013) und LRS (Landerl & Moll, 2010) sowie der Einfluss vorgängiger Interventionen, die nur schwer erfasst werden können. Aber auch Kompensationsstrategien, welche die Schwierigkeiten insbesondere bei einer hohen Intelligenz überdecken sowie Zusammenhänge mit anderen

Gebieten, beispielsweise der Sprache, welche mit einer Überlappung der entsprechenden neuronalen Netzwerke in Verbindung stehen (Prado et al., 2011), können das Bestehen oder Ausmass einer Dyskalkulie verbergen. Diese Faktoren müssen deshalb sowohl in der Forschung als auch in der Praxis stets beachtet werden.

Diagnostik

Die Verhaltensstudie hat klar gezeigt, dass bei Kindern und Jugendlichen mit einer Dyskalkulie typischerweise die basalen numerischen und arithmetischen Kompetenzen beeinträchtigt sind und Rechenstrategien nur in einem geringeren Ausmass angewendet werden können. Das bedeutet, dass bereits bei grundlegenden Fertigkeiten wie dem Zählen, dem Mengenvergleich, der Zahl-Mengen-Zuordnung, dem Schreiben und Lesen arabischer Zahlen oder bezüglich Orientierung auf dem Zahlenstrahl Schwierigkeiten beobachtet werden könnten. Dies hat wiederum zur Folge, dass auch die weiterführende mathematische Entwicklung, zum Beispiel der Aufbau eines Faktenwissens oder das Erlernen effizienter Strategien, Beeinträchtigungen aufweisen dürfte. Rechnen ist eine Fertigkeit, die kulturell beeinflusst und spezifisch unterrichtet in einem langsamen Prozess erworben wird. In diesem fortschreitenden Lernprozess interagieren die verschiedenen Faktoren miteinander. Ist mindestens eine dieser Fertigkeiten beeinträchtigt, kann dies zu einem problematischen Erwerb des Zahlenverständnisses beitragen (Rapin, 2016). Deshalb scheint es lohnenswert, das Störungsbild der Dyskalkulie differenziert zu betrachten und die Diagnostik anhand der Untersuchung einzelner Teilleistungen und einer ganzheitlichen Betrachtung vorzunehmen. Oftmals stehen verschiedene klinische Diagnosen nebeneinander und suggerieren, dass es sich um unabhängige, nebeneinander bestehende Krankheiten handelt (von Aster, 2017). Dieser Umstand erschwert eine (frühe) Erkennung von Rechenstörungen aufgrund der überlappenden Symptome und verhindert damit eine frühzeitige adäquate Intervention. Eine frühe Erkennung der Störung ist für den weiteren Verlauf jedoch massgebend, weshalb vermehrt Diagnoseinstrumente in Form von Screeningverfahren eingesetzt werden sollten, um Betroffene frühzeitig zu erkennen. Damit könnte auch der langfristige Verlauf positiv beeinflusst und die Chancengleichheit erhöht werden. Weil Kinder noch abhängig von ihrem familiären und schulischen Umfeld leben, sollten Eltern wie auch Lehrpersonen unbedingt in diesen Prozess miteinbezogen werden, damit ein möglichst positives Ergebnis erzielt werden kann.

Bildgebung durch Magnetresonanztomographie

Die Untersuchung der neuronalen Struktur von Kindern und Jugendlichen mit einer Dyskalkulie zeigte auf, dass nicht nur beobachtbare Abweichungen der mathematischen Leistungsfähigkeit, sondern auch des Volumens der GM sowie kortikale oberflächenbasierte Kennwerte im Vergleich zu Kindern der KG bestehen. Diese Gehirnveränderungen fanden sich in der vorliegenden Studie über das ganze Gehirn verteilt, was bestätigt, dass beim Rechnen wohl ein weitverbreitetes Netzwerk beteiligt ist (Peters & De Smedt, 2018) und nicht nur rechenspezifische parietale Regionen, wie dies früher angenommen wurde (zum Beispiel Dehaene & Cohen, 1997). Die bisherige Forschung zeigt, dass diese neuronalen strukturellen und funktionellen Netzwerke überlappen, aber nicht identisch sind und eigene Besonderheiten aufweisen (Moeller et al., 2017). Anhand von Querschnittstudien lassen sich keine Schlussfolgerungen über die Entwicklung der mathematischen Fertigkeiten äussern. Eine einzige Längsschnittstudie von McCaskey et al. (2020) hat zu dieser Frage erste mögliche Antworten geliefert. Sie haben aufgezeigt, dass sich bei Kindern mit und ohne Dyskalkulie Veränderungen der GM und WM über die Zeit beobachten liessen, was anhand von mikrostrukturellen Mechanismen erklärt wurde (Houston et al., 2013). Dabei wurde ersichtlich, dass die beobachteten Gruppenunterschiede hinsichtlich des Volumens der GM und WM über die Zeit stabil blieben, was mit den persistenten Verhaltensmerkmalen übereinstimmte. Im Vergleich dazu fallen Volumenunterschiede bei Erwachsenen mit und ohne Dyskalkulie subtiler aus (Cappelletti & Price, 2014) oder lassen sich gar nicht beobachten (Moreau et al., 2019). Dabei stellt sich die Frage, inwiefern strukturelle Gehirnunterschiede im Vergleich zwischen Kindern und Erwachsenen mit Dyskalkulie bestehen, inwiefern in den Jahren zwischen Kindheit und Erwachsenenalter kortikale Veränderungen stattfinden, auf welcher Basis sich diese ereignen und inwiefern sie mit dem Bildungslevel oder Alter in Verbindung stehen. Um diese Fragen zu beantworten, braucht es weitere Längsschnittstudien.

Praktische Relevanz

Ein grosser Vorteil von MRT-Studien liegt darin, wissenschaftlich fundierte Kenntnisse zu erlangen, die der Praxis zur Verfügung gestellt werden können. Damit ist es möglich, Interventionen entsprechend dem aktuellen Kenntnisstand anzupassen und auszuführen sowie Klarheit über das Störungsbild zu generieren. Dass Interventionen eine Verbesserung des Rechnens sowohl auf Leistungs- wie auch auf neuronaler Ebene hervorrufen können, konnten beispielsweise Kucian et al. (2011) aufzeigen. Die

Hirnaktivitätsmuster von Kindern mit Dyskalkulie glichen nach einem numerischen Training deutlicher jenen von Kindern ohne Dyskalkulie. Solche Kenntnisse sind für die Praxis äusserst relevant und könnten helfen, Interventionen gezielt durchzuführen. Eigene Beobachtungen führen zu der Annahme, dass bis heute ein grundlegendes Verständnis der Dyskalkulie nicht immer zu bestehen scheint. Menschen mit Rechenstörungen werden aufgrund ihrer mathematischen Schwächen als dumm oder faul bezeichnet und mit ihren Nöten alleine gelassen. Die Forschung hat die Möglichkeit (und Verpflichtung), eine aufklärende Rolle einzunehmen und sowohl Betroffene wie auch Lehrpersonen zu informieren. Die Tatsache, dass die Dyskalkulie neurobiologisch erklärt und als neurologisches Störungsbild verstanden werden kann, dürfte Betroffene entlasten und mögliche Scham- und Schuldgefühle reduzieren. Durch das zusätzliche Wissen und Verständnis lassen sich Vorurteile abbauen und ein angemessener Umgang mit der Störung kann entstehen. Die Erkenntnisse der Neurowissenschaften zeigen heutzutage bedeutende Implikationen für praktisches Handeln gerade in pädagogischen Kontexten auf (Folta-Schoofs & Ostermann, 2019). Hierbei ist eine gute Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Disziplinen gefragt. Und vielleicht kann in Zukunft die Dyskalkulie-Diagnostik mit bildgebenden Verfahren wie der MRT ergänzt werden.

Zukunft

Zukünftige Studien sollten mit einem Längsschnittstudiendesign durchgeführt werden, um mehr Kenntnisse zu Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen zu erhalten. Zudem sollte ein einheitlicheres Vorgehen gewählt werden, um eine Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen zu gewährleisten und damit aussagekräftige Interpretationen formulieren zu können. Dafür können verbesserte Analysen wie die SBM oder fortgeschrittenere multivariate Methoden angewendet werden. Aufgrund der weit verteilten Gehirnareale, welche in Zusammenhang mit dem Rechnen und der Zahlenverarbeitung zu stehen scheinen und auf ein neuronales Netzwerk hinweisen, ist es sinnvoll, vermehrt die Verbindungen von Gehirnarealen anhand von DTI- oder anderen Konnektivitäts-Analysen zu untersuchen. Kleine Altersspannen helfen zudem, auch im Entwicklungsverlauf von Kindern valide Ergebnisse zu erhalten. Aufgrund des heterogenen Störungsbildes der Dyskalkulie sollten Untersuchungen sowohl die domänenspezifischen wie auch domänenübergreifenden Aspekte von Rechenstörungen integrieren und den Blick auf das Gesamtbild halten sowie gleichzeitig differenziert Teilleistungen prüfen. Forschung ist bestenfalls so gestaltet, dass praktische Implikationen möglich sind.

Fazit und Ausblick

Basisnumerische Fertigkeiten sind bei DD eingeschränkt und betreffen sowohl jüngere und weniger gut gebildete als auch ältere und gut gebildete Personen. Da die weiteren mathematischen Fertigkeiten auf den basisnumerischen Kenntnissen aufbauen, kommt diesen eine Schlüsselrolle zu. Defizite der basisnumerischen Fertigkeiten sollten möglichst früh erkannt werden und deren Erfassung in der Dyskalkulie-Diagnostik enthalten sein. Somit können Interventionen früh und spezifisch durchgeführt werden und möglicherweise viel Leid ersparen, welches DD meist über Jahre erfahren. Die Analysen zur neuronalen Struktur von Dyskalkulie haben zudem aufgezeigt, dass Unterschiede des Volumens der GM, der sulcalen Tiefe und der Oberflächenkomplexität im Vergleich zu Kindern der KG bestehen. Erkenntnisse hinsichtlich der neuroanatomischen Begebenheiten bei Dyskalkulie, welche aus den MRT-Forschungen entstanden sind, dürften helfen, eine Erklärung für vorhandene Schwierigkeiten und Akzeptanz in der Gesellschaft zu finden. Dyskalkulie-Diagnosen können zwar (noch) nicht anhand von MRT-Untersuchungen vorgenommen werden, jedoch könnte weiteres Wissen und Verständnis helfen, den Umgang und die Interventionen zu optimieren. Um diesem Ziel einen Schritt näher zu kommen, braucht es jedoch weitere Untersuchungen, insbesondere über längere Zeitperioden hinweg. Um den Kreis zu schliessen, kann auf die zu Beginn gestellte Frage nach der Trivialität von schlechten Mathematikleistungen klar geantwortet werden, dass diese, im Rahmen einer Entwicklungsstörung, hohe Relevanz aufweisen. Sie stehen in Zusammenhang mit dem Privatleben wie auch der schulischen und beruflichen Zukunft und beeinflussen möglicherweise die Gesundheit und den Lebensstil der Betroffenen nachhaltig. Diese Tatsache dürfte auch die volkswirtschaftliche Bedeutung von Dyskalkulie in unserer Gesellschaft verdeutlichen. In diesem Sinne betreffen Störungen wie die Dyskalkulie uns alle.

Literaturverzeichnis

- Alarcón, M., DeFries, J. C., Light, J. G. & Pennington, B. F. (1997). A twin study of mathematics disability. *Journal of Learning Disabilities*, 30(6), 617–623.
doi:10.1177/002221949703000605
- American Psychiatric Association (2013). *Specific Learning Disorder*. Abgerufen von <https://www.psychiatry.org/patients-families/specific-learning-disorder/what-is-specific-learning-disorder>
- Anders, Y., Rossbach, H. G., Weinert, S., Ebert, S., Kuger, S., Lehl, S. & von Maurice, J. (2012). Home and preschool learning environments and their relations to the development of early numeracy skills. *Early Childhood Research Quarterly*, 27(2), 231–244. doi:10.1016/j.ecresq.2011.08.003
- Ansari, D. (2010). Neurocognitive approaches to developmental disorders of numerical and mathematical cognition: The perils of neglecting the role of development. *Learning and Individual Differences*, 20(2), 123–129. doi:10.1016/j.lindif.2009.06.001
- Ansari, D., Donlan, C., Thomas, M. S., Ewing, S. A., Peen T., & Karmiloff-Smith, A. (2003). What makes counting count? Verbal and visuo-spatial contributions to typical and atypical number development. *Journal of Experimental Child Psychology*, 85(1), 50–62. doi:10.1016/S0022-0965(03)00026-2
- Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften (AWMF). (2012). Ständige Kommission Leitlinien. S3-Leitlinien. Diagnostik und Behandlung der Rechenstörung. Abgerufen von <https://www.awmf.org/leitlinien/detail/ll/028-046.html>
- Arsalidou, M. & Taylor, M. J. (2011). Is $2 + 2 = 4$? Meta-analyses of brain areas needed for numbers and calculations. *Neuroimage*, 54(3), 2382–2393.

- Ashburner, J. (2007). A fast diffeomorphic image registration algorithm. *NeuroImage*, 38(1), 95–113. doi:10.1016/j.neuroimage.2007.07.007
- Ashburner, J. & Friston, K. J. (2005). Unified segmentation. *NeuroImage*, 26(3), 839–851. doi:10.1016/j.neuroimage.2005.02.018
- Ashcraft, M. H. & Krause, J. A. (2007). Working memory, math performance, and math anxiety. *Psychonomic Bulletin & Review*, 14(2), 243–248. doi:10.3758/BF03194059
- Barnes, M. A., Smith-Chant, B. & Landry, S. H. (2005). Number processing in neurodevelopmental disorders: Spina bifida myelomeningocele. In J. I. D. Campbell (Hrsg.), *Handbook of mathematical cognition* (S. 299–313). New York, NY: Psychology Press.
- Baron, I. S. (2004). *Neuropsychological evaluation of the child*. New York, NY: Oxford University Press.
- Bartelet, D., Vaessen, A., Blomert, L. & Ansari, D. (2014). What basic number processing measures in kindergarten explain unique variability in first-grade arithmetic proficiency? *Journal of Experimental Child Psychology*, 117, 12–28. doi:10.1016/j.jecp.2013.08.010
- Beblo, T., Macek, C., Brinkers, I., Hartje, W. & Klaver, P. (2004). A new approach in clinical neuropsychology to the assessment of spatial working memory: The block suppression test. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 26(1), 105–114. doi:10.1076/jcen.26.1.105.23938
- Beitchman, J. H. & Young, A. R. (1997). Learning disorders with a special emphasis on reading disorders: A review of the past 10 years. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 36(8), 1020–1032. doi:10.1097/00004583-199708000-00009

- Benedetto-Nasho, E. & Tannock, R. (1999). Math computation, error patterns and stimulant effects in children with attention deficit hyperactivity disorder. *Journal of Attention Disorders*, 3(3), 121–134. doi:10.1177/108705479900300301
- Blakemore, S. J., Burnett, S. & Dahl, R. E. (2010). The role of puberty in the developing adolescent brain. *Human Brain Mapping*, 31(6), 926–933. doi:10.1002/hbm.21052
- Brannon, E. M. & Terrace, H. S. (2000). Representation of the numerosities 1–9 by rhesus macaques (*Macaca mulatta*). *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 26(1), 31–49. doi:10.1037/0097-7403.26.1.31
- Buckley, P. B. & Gillman, C. B. (1974). Comparisons of digits and dot patterns. *Journal of Experimental Psychology*, 103(6), 1131–1136. doi:10.1037/h0037361
- Butterworth, B. (1999). *The mathematical brain*. London: Macmillan.
- Butterworth, B. (2011). Foundational numerical capacities and the origins of dyscalculia. In S. Dehaene, E. Brannon, S. Dehaene, & E. Brannon (Hrsg.), *Space, time and number in the brain: Searching for the foundations of mathematical thought* (S. 249–265). Elsevier Academic Press. doi:10.1016/B978-0-12-385948-8.00016-5
- Butterworth, B. & Kovas, Y. (2013). Understanding neurocognitive developmental disorders can improve education for all. *Science*, 340(6130), 300–305. doi:10.1126/science.1231022
- Butterworth, B., Varma, S. & Laurillard, D. (2015). Dyscalculia: From brain to education. In R. C. Kadosh, A. Dowker, R. C. Kadosh & A. Dowker (Hrsg.), *The Oxford handbook of numerical cognition* (S. 647–661). New York, NY: Oxford University Press.
- Cantlon, J. F., Brannon, E. M., Carter, E. J. & Pelphrey, K. A. (2006). Functional imaging of numerical processing in adults and 4-y-old children. *PLoS Biology*, 4(5), e125. doi:10.1371/journal.pbio.0040125

- Cappelletti, M. & Price, C. J. (2014). Residual number processing in dyscalculia. *NeuroImage: Clinical*, 4, 18–28.
- Card, N. A., Stucky, B. D., Sawalani, G. M. & Little, T. D. (2008). Direct and indirect aggression during childhood and adolescence: A meta-analytic review of gender differences, intercorrelations, and relations to maladjustment. *Child Development*, 79(5), 1185–1229. doi:10.1111/j.1467-8624.2008.01184.x
- Carvalho, M. R. & Haase, V. G. (2019). Genetics of dyscalculia 1: In search of endophenotypes. In A. Fritz, V. G. Haase & P. Räsänen (Hrsg.), *International handbook of mathematical learning difficulties: From the laboratory to the classroom* (S. 345–366). Cham: Springer. doi:10.1007/978-3-319-97148-3_21
- Chang, T. T., Metcalfe, A. W., Padmanabhan, A., Chen, T. & Menon, V. (2016). Heterogeneous and nonlinear development of human posterior parietal cortex function. *NeuroImage*, 126, 184–195. doi:10.1016/j.neuroimage.2015.11.053
- Cho, S., Metcalfe, A. W., Young, C. B., Ryali, S., Geary, D. C. & Menon, V. (2012). Hippocampal–prefrontal engagement and dynamic causal interactions in the maturation of children’s fact retrieval. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 24(9), 1849–1866. doi:10.1162/jocn_a_00246
- Cohen, J. (1992). Statistical power analysis. *Current Directions in Psychological Science*, 1(3), 98–101. doi:10.1111/1467-8721.ep10768783
- Collins, D. L., Neelin, P., Peters, T. M. & Evans, A. C. (1994). Automatic 3D intersubject registration of MR volumetric data in standardized Talairach space. *Journal of Computer Assisted Tomography*, 18(2), 192–205.
- Corsi, P. M. (1972). *Human memory and the medial temporal region of the brain* (Order No. NK14430). ProQuest Dissertations & Theses A&I. (220126758). Abgerufen von <https://www.proquest.com/docview/220126758?accountid=143299>

Cunningham, W. A., Arbuckle, N. L., Jahn, A., Mowrer, S. M. & Abduljalil, A. M. (2011).

Reprint of: Aspects of neuroticism and the amygdala: Chronic tuning from motivational styles. *Neuropsychologia*, 49(4), 657–662.

doi:10.1016/j.neuropsychologia.2011.02.027

Heinrich, J. (2013). Children with ADHD symptoms have a higher risk for reading, spelling and math difficulties in the GINIplus and LISApplus cohort studies. *PloS ONE*, 8(5), e63859. doi:10.1371/journal.pone.0063859

Dahnke, R., Yotter, R. A. & Gaser, C. (2013). Cortical thickness and central surface estimation. *NeuroImage*, 65, 336–348. doi:10.1016/j.neuroimage.2012.09.050

D’Amico, A. & Guarnera, M. (2005). Exploring working memory in children with low arithmetical achievement. *Learning and Individual Differences*, 15(3), 189–202. doi:10.1016/j.lindif.2005.01.002

De Smedt, B., Holloway, I. D. & Ansari, D. (2011). Effects of problem size and arithmetic operation on brain activation during calculation in children with varying levels of arithmetical fluency. *NeuroImage*, 57(3), 771–781. doi:10.1016/j.neuroimage.2010.12.037

De Smedt, B., Noël, M. P., Gilmore, C. & Ansari, D. (2013). How do symbolic and non-symbolic numerical magnitude processing skills relate to individual differences in children’s mathematical skills? A review of evidence from brain and behavior. *Trends in Neuroscience and Education*, 2(2), 48–55. doi:10.1016/j.tine.2013.06.001

De Smedt, B., Peters, L. & Ghesquière, P. (2019). Neurobiological origins of mathematical learning disabilities or dyscalculia: A review of brain imaging data. In A. Fritz, V. G. Haase & P. Räsänen (Hrsg.), *International handbook of mathematical learning difficulties: From the laboratory to the classroom* (S. 367–384). Cham: Springer. doi:10.1007/978-3-319-97148-3_23

- Dehaene, S. (2011). *The number sense: How the mind creates mathematics* (2. Aufl.). New York, NY: Oxford University Press.
- Dehaene, S., Bossini, S. & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General*, 122(3), 371–396.
doi:10.1037/0096-3445.122.3.371
- Dehaene, S. & Cohen, L. (1995). Towards an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical Cognition*, 1(1), 83–120.
- Dehaene, S. & Cohen, L. (1997). Cerebral pathways for calculation: Double dissociation between rote verbal and quantitative knowledge of arithmetic. *Cortex*, 33(2), 219–250. doi:10.1016/S0010-9452(08)70002-9
- Dennis, M., Francis, D. J., Cirino, P. T., Schachar, R., Barnes, M. A. & Fletcher, J. M. (2009). Why IQ is not a covariate in cognitive studies of neurodevelopmental disorders. *Journal of the International Neuropsychological Society: JINS*, 15(3), 331–343. doi:10.1017/S1355617709090481
- Desai, R., Liebenthal, E., Possing, E. T., Waldron, E. & Binder, J. R. (2005). Volumetric vs. surface-based alignment for localization of auditory cortex activation. *NeuroImage*, 26(4), 1019–1029. doi:10.1016/j.neuroimage.2005.03.024
- Desoete, A., Roeyers, H. & De Clercq, A. (2004). Children with mathematics learning disabilities in Belgium. *Journal of Learning Disabilities*, 37(1), 50–61.
doi:10.1177/00222194040370010601
- Dilling, H., Mombour, W. & Schmidt, M. H. (2014). *Internationale Klassifikation psychischer Störungen. ICD-10 Kapitel V (F). Klinisch-diagnostische Leitlinien* (9. Aufl.). Bern: Huber.

- Döring, N., Bortz, J. & Pöschl, S. (2016). Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften (5., überarb. und erw. Aufl.). Berlin: Springer.
doi:10.1007/978-3-642-41089-5
- Dowker, A., Sarkar, A. & Looi, C. Y. (2016). Mathematics anxiety: What have we learned in 60 years? *Frontiers in Psychology*, 7, 508. doi:10.3389/fpsyg.2016.00508
- Drechsler, R. & Günther, T. (2018). Neuropsychologische Testverfahren für Kinder und Jugendliche. Einführung. In D. Schellig, D. Heinemann, B. Schächtele, W. Sturm, R. Drechsler, T. Günther, J. Küst & A. Schale (Hrsg.), *Handbuch neuropsychologischer Testverfahren* (Band 2, S. 23–52). Göttingen: Hogrefe. doi:10.1026/01858-000
- Dupont, S. (2002). Investigating temporal pole function by functional imaging. *Epileptic Disorders*, 4(1), 17–22.
- Ehlert, A., Schroeders, U. & Fritz-Stratmann, A. (2012). Kritik am Diskrepanzkriterium in der Diagnostik von Legasthenie und Dyskalkulie. *Lernen und Lernstörungen*, 1(3), 169–184. doi:10.1024/2235-0977/a000018
- Eickhoff, S. B., Paus, T., Caspers, S., Grosbras, M. H., Evans, A. C., Zilles, K. & Amunts, K. (2007). Assignment of functional activations to probabilistic cytoarchitectonic areas revisited. *NeuroImage*, 36(3), 511–521. doi:10.1016/j.neuroimage.2007.03.060
- Eickhoff, S. B., Stephan, K. E., Mohlberg, H., Grefkes, C., Fink, G. R., Amunts, K. & Zilles, K. (2005). A new SPM toolbox for combining probabilistic cytoarchitectonic maps and functional imaging data. *NeuroImage*, 25(4), 1325–1335.
doi:10.1016/j.neuroimage.2004.12.034
- Emerson, R. W. & Cantlon, J. F. (2015). Continuity and change in children's longitudinal neural responses to numbers. *Developmental Science*, 18(2), 314–326.
doi:10.1111/desc.12215

- Evans, T. M., Kochalka, J., Ngoon, T. J., Wu, S. S., Qin, S., Battista, C. & Menon, V. (2015). Brain structural integrity and intrinsic functional connectivity forecast 6 year longitudinal growth in children's numerical abilities. *Journal of Neuroscience*, 35(33), 11743–11750. doi:10.1523/JNEUROSCI.0216-15.2015
- Feigenson, L., Carey, S. & Spelke, E. (2002). Infants' discrimination of number vs. continuous extent. *Cognitive Psychology*, 44(1), 33–66. doi:10.1006/cogp.2001.0760
- Feigenson, L., Dehaene, S. & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(7), 307–314. doi:10.1016/j.tics.2004.05.002
- Fias, W., Menon, V. & Szucs, D. (2013). Multiple components of developmental dyscalculia. *Trends in Neuroscience and Education*, 2(2), 43–47. doi:10.1016/j.tine.2013.06.006
- Fischbach, A., Schuchardt, K., Brandenburg, J., Kleszczewski, J., Balke-Melcher, C., Schmidt, C., ... Hasselhorn, M. (2013). Prävalenz von Lernschwächen und Lernstörungen: Zur Bedeutung der Diagnosekriterien. *Lernen und Lernstörungen*, 2(2), 65–76. doi:10.1024/2235-0977/a000035
- Floyd, R. G., Evans, J. J. & McGrew, K. S. (2003). Relations between measures of Cattell-Horn-Carroll (CHC) cognitive abilities and mathematics achievement across the school-age years. *Psychology in the Schools*, 40(2), 155–171. doi:10.1002/pits.10083
- Folta-Schoofs, K. & Ostermann, B. (2019). *Neurodidaktik: Grundlagen für Studium und Praxis*. Kohlhammer Verlag.
- Fuchs, L. S., Geary, D. C., Fuchs, D., Compton, D. L. & Hamlett, C. L. (2014). Sources of individual differences in emerging competence with numeration understanding versus multidigit calculation skill. *Journal of Educational Psychology*, 106(2), 482–498. doi:10.1037/a0034444

- Fuson, K. C. (1992). Relationships between counting and cardinality from age 2 to age 8. In J. Bideaud, C. Meljac, J.-P. Fischer, J. Bideaud, C. Meljac & J.-P. Fischer (Hrsg.), *Pathways to number: Children's developing numerical abilities* (S. 127–149). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Gaser, C., & Dahnke, R. (2016). CAT-a computational anatomy toolbox for the analysis of structural MRI data. *HBM*, 336–348.
- Geary, D. C. (2011). Consequences, characteristics, and causes of mathematical learning disabilities and persistent low achievement in mathematics. *Journal of Developmental and Behavioral Pediatrics*, 32(3), 250–263. doi:10.1097/DBP.0b013e318209edef
- Geary, D. C., Bailey, D. H. & Hoard, M. K. (2009). Predicting mathematical achievement and mathematical learning disability with a simple screening tool: The number sets test. *Journal of Psychoeducational Assessment*, 27(3), 265–279.
doi:10.1177/0734282908330592
- Geary, D. C., Bow-Thomas, C. C. & Yao, Y. (1992). Counting knowledge and skill in cognitive addition: A comparison of normal and mathematically disabled children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 54(3), 372–391. doi:10.1016/0022-0965(92)90026-3
- Geary, D. C., Hamson, C. & Hoard, M. (2000). Numerical and arithmetical cognition: A longitudinal study of process and concept deficits in children with learning disability. *Journal of Experimental Child Psychology*, 77(3), 236–263.
doi:10.1006/jecp.2000.2561
- Geary, D. C. & Hoard, M. K. (2005). Learning disabilities in arithmetic and mathematics: Theoretical and empirical perspectives. In J. I. D. Campbell (Hrsg.), *Handbook of mathematical cognition* (S. 253–267). New York, NY: Psychology Press.

- Geary, D. C., Hoard, M. K. & Hamson, C. O. (1999). Numerical and arithmetical cognition: Patterns of functions and deficits in children at risk for a mathematical disability. *Journal of Experimental Child Psychology*, 74(3), 213–239.
doi:10.1006/jecp.1999.2515
- Gelman, R. & Gallistel, C. R. (1978). *The child's concept of number*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Gerardi, K., Goette, L. & Meier, S. (2013). Numerical ability predicts mortgage default. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(28), 11267–11271.
doi:10.1073/pnas.1220568110
- Grob, A. & Hagmann-von Arx, P. (2018). *IDS-2 – Intelligence and Development Scales – 2. Intelligenz- und Entwicklungsskalen für Kinder und Jugendliche – Testkoffer*. Bern: Hogrefe. Abgerufen von <https://edoc.unibas.ch/67802/>
- Grond, U., Schweiter, M. & von Aster, M. (2013). Neuropsychologie numerischer Repräsentationen. In M. von Aster & J. H. Lorenz (Hrsg.), *Rechenstörungen bei Kindern - Neurowissenschaft, Psychologie, Pädagogik* (Vol. 2, S. 39–58). Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht. doi:10.13109/9783666462580.39
- Gross-Tsur, V., Manor, O. & Shalev, R. S. (1996). Developmental dyscalculia: Prevalence and demographic features. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 38(1), 25–33. doi:10.1111/j.1469-8749.1996.tb15029.x
- Grube, D., Busch, J. & Schmidt, C. (2017). Kognitive Bedingungen der Rechenschwäche. In A. Fritz, S. Schmidt & G. Ricken (Hrsg.), *Handbuch Rechenschwäche: Lernwege, Schwierigkeiten und Hilfen bei Dyskalkulie* (3. Aufl., S. 126–140). Weinheim: Beltz.

- Haase, V. G. & Krinzinger, H. (2019). Adding all up: Mathematical learning difficulties around the world. In A. Fritz, V. G. Haase & P. Räsänen (Hrsg.), *International handbook of mathematical learning difficulties: From the laboratory to the classroom* (S. 311–325). Cham: Springer. doi:10.1007/978-3-319-97148-3
- Haberstroh, S. & Schulte-Körne, G. (2019). The diagnosis and treatment of dyscalculia. *Deutsches Ärzteblatt International*, 116(7), 107–114. doi:10.3238/arztebl.2019.0107
- Han, Z., Davis, N., Fuchs, L., Anderson, A. W., Gore, J. C. & Dawant, B. M. (2013). Relation between brain architecture and mathematical ability in children: A DBM study. *Magnetic Resonance Imaging*, 31(10), 1645–1656. doi:10.1016/j.mri.2013.08.008
- Heidekum, A. E., Vogel, S. E. & Grabner, R. H. (2020). Associations Between Individual Differences in Mathematical Competencies and Surface Anatomy of the Adult Brain. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14, 116.
- Houston, S. M., Herting, M. M. & Sowell, E. R. (2013). The neurobiology of childhood structural brain development: Conception through adulthood. In S. L. Andersen & D. S. Pine (Hrsg.), *The Neurobiology of Childhood*. (Vol. 16, S. 3–17). Heidelberg: Springer. doi:10.1007/7854_2013_265
- Hubbard, E. M., Piazza, M., Pinel, P. & Dehaene, S. (2005). Interactions between number and space in parietal cortex. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(6), 435–448. doi:10.1038/nrn1684
- Isaacs, E. B., Edmonds, C. J., Lucas, A. & Gadian, D. G. (2001). Calculation difficulties in children of very low birthweight: A neural correlate. *Brain*, 124(9), 1701–1707. doi:10.1093/brain/124.9.1701
- Jäncke, L. (2005). *Methoden der Bildgebung in der Psychologie und den kognitiven Neurowissenschaften*. Stuttgart: Kohlhammer.

- Jäncke, L. (2017). *Lehrbuch Kognitive Neurowissenschaften* (2. überarb. Aufl.). Bern: Hogrefe. doi:10.1024/85811-000
- Johnson, M. H. & de Haan, M. (2011). *Developmental Cognitive Neuroscience* (3. Aufl.). Malden, MA: Wiley-Blackwell.
- Jolles, D., Wassermann, D., Chokhani, R., Richardson, J., Tenison, C., Bammer, R., ... Menon, V. (2016). Plasticity of left perisylvian white-matter tracts is associated with individual differences in math learning. *Brain Structure and Function*, 221(3), 1337–1351. doi:10.1007/s00429-014-0975-6
- Jordan, K. E. & Brannon, E. M. (2003). Cardinal number representation in Rhesus monkeys. *Poster presented at the annual North Carolina Cognition Group Conference, Durham, NC.*
- Jordan, N. C., Hanich, L. B. & Kaplan, D. (2003). A longitudinal study of mathematical competencies in children with specific mathematics difficulties versus children with comorbid mathematics and reading difficulties. *Child Development*, 74(3), 834–850. doi:10.1111/1467-8624.00571
- Jordan, N. C., Kaplan, D., Ramineni, C. & Locuniak, M. N. (2009). Early math matters: Kindergarten number competence and later mathematics outcomes. *Developmental Psychology*, 45(3), 850–867. doi:10.1037/a0014939
- Kaufman, A. S. & Kaufman, N. L. (2004). *Kaufman assessment battery for children-second edition (K-ABC-II)*. Circle Pines, MN: American Guidance Service
- Kaufmann, L. (2008). Neural correlates of number processing and calculation: Developmental trajectories and educational implications. In A. Dowker (Hrsg.), *Mathematical Difficulties* (S. 1–12). San Diego, CA: Academic Press. doi:10.1016/B978-012373629-1.50003-4

- Kaufmann, L., Proksch, K. & Mrakotsky, C. (2011). Entwicklungsneuropsychologie. In J. Lehrner, G. Pusswald, E. Fertl, W. Strubreither & I. Kryspin-Exner (Hrsg.), *Klinische Neuropsychologie* (2. Aufl., S. 173–183). Wien: Springer. doi:10.1007/978-3-7091-0064-6
- Kaufmann, L., Wood, G., Rubinsten, O. & Henik, A. (2011). Meta-analyses of developmental fMRI studies investigating typical and atypical trajectories of number processing and calculation. *Developmental Neuropsychology*, 36(6), 763–787. doi:10.1080/87565641.2010.549884
- Kawashima, R., Taira, M., Okita, K., Inoue, K., Tajima, N., Yoshida, H., ... Fukuda, H. (2004). A functional MRI study of simple arithmetic - A comparison between children and adults. *Cognitive Brain Research*, 18(3), 227–233. doi:10.1016/j.cogbrainres.2003.10.009
- Kesler, S. R., Menon, V. & Reiss, A. L. (2006). Neurofunctional differences associated with arithmetic processing in Turner syndrome. *Cerebral Cortex*, 16(6), 849–856.
- Klasen, F., Petermann, F., Meyrose, A. K., Barkmann, C., Otto, C., Haller, A. C., ... Ravens-Sieberer, U. (2016). Verlauf psychischer Auffälligkeiten von Kindern und Jugendlichen. *Kindheit und Entwicklung: Ergebnisse der BELLA-Kohortenstudie*, 25(1), 10–20. Hogrefe. Abgerufen von <https://econtent.hogrefe.com/doi/abs/10.1026/0942-5403/a000184>
- Klein, E., Suchan, J., Moeller, K., Karnath, H. O., Knops, A., Wood, G., ... Willmes, K. (2016). Considering structural connectivity in the triple code model of numerical cognition: Differential connectivity for magnitude processing and arithmetic facts. *Brain Structure and Function*, 221(2), 979–995. doi:10.1007/s00429-014-0951-1

Kohn, J., Richtmann, V., Rauscher, L., Kucian, K., Käser, T., Grond, U., Esser, G. & von

Aster, M. (2013). Das Mathematikangstinterview (MAI). Erste psychometrische

Gütekriterien. *Lernen und Lernstörungen*, 2, 177-189. doi:10.1024/2235-

0977/a000040

Kohn, J., Wyschkon, A., Ballaschk, K., Ihle, W. & Esser, G. (2013). Verlauf von

umschriebenen Entwicklungsstörungen: Eine 30-Monats-Follow-up-Studie. *Lernen*

und Lernstörungen, 2(2), 77–89. doi:10.1024/2235-0977/a000032

Kovas, Y., Giampietro, V., Viding, E., Ng, V., Brammer, M., Barker, G. J., ... Plomin, R.

(2009). Brain correlates of non-symbolic numerosity estimation in low and high

mathematical ability children. *PLoS ONE*, 4(2), e4587.

doi:10.1371/journal.pone.0004587

Krinzinger, H. (2016). Differenzialdiagnose zwischen primärer Rechenstörung und

sekundärer Rechenschwäche: Hinweise aus dem Basis-Math 4–8. *Zeitschrift für*

Kinder- und Jugendpsychiatrie und Psychotherapie, 44(5), 338–350.

doi:10.1024/1422-4917/a000446

Krinzinger, H. & Günther, T. (2019). Zahlenverarbeitung und Rechnen. In D. Schellig, D.

Heinemann, B. Schächtele & W. Sturm (Hrsg.), *Handbuch neuropsychologischer*

Testverfahren (Bd. 3, S. 195–270). Göttingen: Hogrefe. doi:10.1026/02845-000

Krinzinger, H., Kaufmann, L. & Willmes, K. (2009). Math anxiety and math ability in early

primary school years. *Journal of Psychoeducational Assessment*, 27(3), 206–225.

doi:10.1177/0734282908330583

Kucian, K. (2016). Developmental dyscalculia and the brain. In D. B. Berch, D. C. Geary &

K. Mann Koepke (Hrsg.), *Development of mathematical cognition* (Vol. 2, S. 165–

193). San Diego, CA: Elsevier Academic Press. doi. 10.1016/B978-0-12-801871-

2.00007-1

- Kucian, K., Ashkenazi, S. S., Hänggi, J., Rotzer, S., Jäncke, L., Martin, E. & von Aster, M. G. (2014). Developmental dyscalculia: A dysconnection syndrome? *Brain Structure and Function*, 219(5), 1721–1733. doi:10.1007/s00429-013-0597-4
- Kucian, K., Grond, U., Rotzer, S., Henzi, B., Schönmann, C., Plangger, F., ... von Aster, M. (2011). Mental number line training in children with developmental dyscalculia. *NeuroImage*, 57(3), 782–795. doi: 10.1016/j.neuroimage.2011.01.070
- Kucian, K., Loenneker, T., Dietrich, T., Dosch, M., Martin, E. & von Aster, M. (2006). Impaired neural networks for approximate calculation in dyscalculic children: A functional MRI study. *Behavioral and Brain Functions*, 2(1), 31. doi:10.1186/1744-9081-2-31
- Kucian, K., McCaskey, U., O’Gorman Tuura, R. & von Aster, M. (2018). Neurostructural correlate of math anxiety in the brain of children. *Translational Psychiatry*, 8(1), 273. doi:10.1038/s41398-018-0320-6
- Kuhn, J. T., Ise, E., Raddatz, J., Schwenk, C. & Dobel, C. (2016). Basic numerical processing, calculation, and working memory in children with dyscalculia and/or ADHD symptoms. *Zeitschrift für Kinder-und Jugendpsychiatrie und Psychotherapie*, 44(5), 365–375. doi:10.1024/1422-4917/a000450
- Landerl, K. (2013). Development of numerical processing in children with typical and dyscalculic arithmetic skills – A longitudinal study. *Frontiers in Psychology*, 4, 459. doi:10.3389/fpsyg.2013.00459
- Landerl, K., Fussenegger, B., Moll, K. & Willburger, E. (2009). Dyslexia and dyscalculia: Two learning disorders with different cognitive profiles. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103(3), 309–324. doi:10.1016/j.jecp.2009.03.006

- Landerl, K. & Moll, K. (2010). Comorbidity of learning disorders: Prevalence and familial transmission. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 51(3), 287–294.
doi:10.1111/j.1469-7610.2009.02164.x
- Landerl, K., Vogel, S. & Kaufmann, L. (2017). *Dyskalkulie: Modelle, Diagnostik, Intervention* (3. Aufl.). München: Reinhardt.
- LeFevre, J. A., Fast, L., Skwarchuk, S. L., Smith-Chant, B. L., Bisanz, J., Kamawar, D. & Penner-Wilger, M. (2010). Pathways to mathematics: Longitudinal predictors of performance. *Child Development*, 81(6), 1753–1767. doi:10.1111/j.1467-8624.2010.01508.x
- Leibovich, T. & Henik, A. (2013). Magnitude processing in non-symbolic stimuli. *Frontiers in Psychology*, 4(375), 1–6. doi:10.3389/fpsyg.2013.00375
- Li, Y., Hu, Y., Wang, Y., Weng, J. & Chen, F. (2013). Individual structural differences in left inferior parietal area are associated with schoolchildrens' arithmetic scores. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 844. doi:10.3389/fnhum.2013.00844
- Li, Y. & Lappan, G. (2014). Mathematics curriculum in school education: Advancing research and practice from an international perspective. In Y. Li & G. Lappan (Hrsg.), *Mathematics curriculum in school education* (S. 3–12). Dordrecht: Springer.
doi:10.1007/978-94-007-7560-2_1
- Luders, E., Narr, K. L., Thompson, P. M., Rex, D. E., Jancke, L., Steinmetz, H. & Toga, A. W. (2004). Gender differences in cortical complexity. *Nature Neuroscience*, 7(8), 799–800. doi:10.1038/nn1277
- Lyons, I. M. & Beilock, S. L. (2012). When math hurts: Math anxiety predicts pain network activation in anticipation of doing math. *PloS one*, 7(10), e48076.
- Madan, C. R. & Kensinger, E. A. (2016). Cortical complexity as a measure of age-related brain atrophy. *NeuroImage*, 134, 617–629.

Maloney, E. A., Ramirez, G., Gunderson, E. A., Levine, S. C. & Beilock, S. L. (2015).

Intergenerational effects of parents' math anxiety on children's math achievement and anxiety. *Psychological Science*, 26(9), 1480–1488. doi:10.1177/0956797615592630

Manjón, J., Coupe, P., Marti-Bonmati, L., Collins, D. L. & Robles, M. (2010). Adaptive non-local means denoising of MR images with spatially varying noise levels. *Journals of Magnetic Resonance Imaging*, 31, 192–203. doi:10.1002/jmri.22003

Matejko, A. A., Price, G. R., Mazzocco, M. M. & Ansari, D. (2013). Individual differences in left parietal white matter predict math scores on the Preliminary Scholastic Aptitude Test. *NeuroImage*, 66, 604–610. doi:10.1016/j.neuroimage.2012.10.045

Mazzocco, M. M. & Thompson, R. E. (2005). Kindergarten predictors of math learning disability. *Learning Disabilities Research & Practice*, 20(3), 142–155. doi:10.1111/j.1540-5826.2005.00129.x

McCaskey, U., von Aster, M., O’Gorman, R. & Kucian, K. (2020). Persistent differences in brain structure in developmental dyscalculia: A longitudinal morphometry study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14, 272. doi:10.3389/fnhum.2020.00272

McCaskey, U., von Aster, M., O’Gorman, R. & Kucian, K. (2017). Dyscalculia do not have a generalized magnitude deficit – Processing of discrete and continuous magnitudes. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11(102), 1–19. doi:10.3389/fnhum.2017.00102

Menon, V. (2016). Working memory in children's math learning and its disruption in dyscalculia. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 10, 125–132. doi:10.1016/j.cobeha.2016.05.014

Moeller, K., Klein, E. & Kaufmann, L. (2017). Bedeutung der neurokognitiven und bildgebenden Befunde für ein besseres Verständnis von Rechenschwierigkeiten. In A. Fritz, S. Schmidt & G. Ricken (Hrsg.), *Handbuch Rechenschwäche: Lernwege, Schwierigkeiten und Hilfen bei Dyskalkulie* (3. Aufl., S. 80–95). Weinheim: Beltz.

- Moreau, D., Wiebels, K., Wilson, A. J. & Waldie, K. E. (2019). Volumetric and surface characteristics of gray matter in adult dyslexia and dyscalculia. *Neuropsychologia*, 127, 204–210.
- Mori, S., & Zhang, J. (2006). Principles of diffusion tensor imaging and its applications to basic neuroscience research. *Neuron*, 51(5), 527-539.
doi:10.1016/j.neuron.2006.08.012
- Moser Opitz, E., Reusser, L., Moeri Müller, M., Anliker, B., Wittich, C. & Freesemann, O. (2010). *BASIS-MATH 4–8: Basisdiagnostik Mathematik für die Klassen 4–8*. Bern: Huber.
- Moyer, R. S. & Landauer, T. K. (1967). Time required for judgements of numerical inequality. *Nature*, 215(5109), 1519–1520. doi:10.1038/2151519a0
- Mullis, I. V., Martin, M. O., Foy, P. & Hooper, M. (2016). *TIMSS 2015: International results in mathematics*. Abgerufen von <http://timssandpirls.bc.edu/timss2015/international-results/>
- Mussolin, C., De Volder, A., Grandin, C., Schlögel, X., Nassogne, M. C. & Noël, M. P. (2010). Neural correlates of symbolic number comparison in developmental dyscalculia. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(5), 860–874.
doi:10.1162/jocn.2009.21237
- Niklas, F. & Schneider, W. (2012). Die Anfänge geschlechtsspezifischer Leistungsunterschiede in mathematischen und schriftsprachlichen Kompetenzen. *Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und Pädagogische Psychologie*, 44(3), 123–138. doi:10.1026/0049-8637/a000064
- Norton, E. S., Beach, S. D. & Gabrieli, J. D. (2015). Neurobiology of dyslexia. *Current opinion in neurobiology*, 30, 73–78.

- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97–113. doi:10.1016/0028-3932(71)90067-4
- Opfer, J. E. & Siegler, R. S. (2007). Representational change and children's numerical estimation. *Cognitive Psychology*, 55(3), 169–195.
doi:10.1016/j.cogpsych.2006.09.002
- Osborne, J. W. (2001). Testing stereotype threat: Does anxiety explain race and sex differences in achievement? *Contemporary Educational Psychology*, 26(3), 291–310.
doi:10.1006/ceps.2000.1052
- Parsons, S. & Bynner, J. (2005). *Does numeracy matter more? London*: National Research and Development Centre for Adult Literacy and Numeracy. Abgerufen von <http://www.nrdc.org.uk/wp-content/uploads/2005/01/does-numeracy-matter-more.pdf>
- Passolunghi, M. C., Marzocchi, G. M. & Fiorillo, F. (2005). Selective effect of inhibition of literal or numerical irrelevant information in children with attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) or arithmetic learning disorder (ALD). *Developmental Neuropsychology*, 28(3), 731–753. doi:10.1207/s15326942dn2803_1
- Passolunghi, M. C. & Pazzaglia, F. (2004). Individual differences in memory updating in relation to arithmetic problem solving. *Learning and Individual Differences*, 14(4), 219–230. doi:10.1016/j.lindif.2004.03.001
- Pennington, B. F. (2006). From single to multiple deficit models of developmental disorders. *Cognition*, 101(2), 385–413. doi:10.1016/j.cognition.2006.04.008
- Petermann F. (2012). *WAIS-IV: Wechsler adult intelligence scale – fourth edition. Deutschsprachige Adaption*. Frankfurt/Main: Pearson.
- Petermann, F. (2017). *WISC-V: Wechsler Intelligence Scale for Children - fifth edition*. Frankfurt: Pearson.

- Petermann, F. & Petermann, U. (2007). *Hamburg-Wechsler Intelligenztest für Kinder IV (HAWIK-IV)*. Bern: Huber.
- Peters, L. & De Smedt, B. (2018). Arithmetic in the developing brain: A review of brain imaging studies. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 30, 265–279.
doi:10.1016/j.dcn.2017.05.002
- Petrill, S. A. & Kovas, Y. (2016). Individual differences in mathematics ability: A behavioral genetic approach. In D. B. Berch, D. C. Geary & K. Mann Koepke (Hrsg.), *Development of mathematical cognition: Neural substrates and genetic influences*. (Vol. 2, S. 299–332). San Diego, CA: Elsevier Academic Press. doi:10.1016/B978-0-12-801871-2.00011-3
- Peucker, S. & Weißhaupt, S. (2017). Entwicklung frühen numerischen Wissens. In A. Fritz, S. Schmidt & G. Ricken (Hrsg.), *Handbuch Rechenschwäche: Lernwege, Schwierigkeiten und Hilfen bei Dyskalkulie* (3. Aufl., S. 47–65). Weinheim: Beltz.
- Polspoel, B., Peters, L., Vandermosten, M. & De Smedt, B. (2017). Strategy over operation: Neural activation in subtraction and multiplication during fact retrieval and procedural strategy use in children. *Human Brain Mapping*, 38(9), 4657–4670.
doi:10.1002/hbm.23691
- Polspoel, B., Vandermosten, M. & De Smedt, B. (2020). The association of grey matter volume and cortical complexity with individual differences in children's arithmetic fluency. *Neuropsychologia*, 137, 107293.
- Prado, J., Mutreja, R., Zhang, H., Mehta, R., Desroches, A. S., Minas, J. E. & Booth, J. R. (2011). Distinct representations of subtraction and multiplication in the neural systems for numerosity and language. *Human brain mapping*, 32(11), 1932–1947.

- Praet, M., Titeca, D., Ceulemans, A. & Desoete, A. (2013). Language in the prediction of arithmetics in kindergarten and grade 1. *Learning and Individual Differences*, 27, 90–96. doi:10.1016/j.lindif.2013.07.003
- Price, G. R., Wilkey, E. D., Yeo, D. J. & Cutting, L. E. (2016). The relation between 1st grade grey matter volume and 2nd grade math competence. *NeuroImage*, 124, 232–237. doi:10.1016/j.neuroimage.2015.08.046
- Qin, S., Cho, S., Chen, T., Rosenberg-Lee, M., Geary, D. C. & Menon, V. (2014). Hippocampal-neocortical functional reorganization underlies children's cognitive development. *Nature Neuroscience*, 17(9), 1263–1269. doi:10.1038/nn.3788
- Ramaa, S. & Gowramma, I. P. (2002). A systematic procedure for identifying and classifying children with dyscalculia among primary school children in India. *Dyslexia*, 8(2), 67–85. doi:10.1002/dys.214
- Ranpura, A., Isaacs, E., Edmonds, C., Rogers, M., Lanigan, J., Singhal, A., ... Butterworth, B. (2013). Developmental trajectories of grey and white matter in dyscalculia. *Trends in Neuroscience and Education*, 2(2), 56–64. doi:10.1016/j.tine.2013.06.007
- Rapin, I. (2016). Dyscalculia and the calculating brain. *Pediatric Neurology*, 61, 11–20. doi:10.1016/j.pediatrneurol.2016.02.007
- Reeve, R., Reynolds, F., Humberstone, J. & Butterworth, B. (2012). Stability and change in markers of core numerical competencies. *Journal of Experimental Psychology: General*, 141(4), 649–666. doi:10.1037/a0027520
- Reigosa-Crespo, V., Valdés-Sosa, M., Butterworth, B., Estévez, N., Rodríguez, M., Santos, E., ... Lage, A. (2012). Basic numerical capacities and prevalence of developmental dyscalculia: The Havana Survey. *Developmental Psychology*, 48(1), 123–135. doi:10.1037/a0025356.

- Resnick, L. B. (1992). From protoquantities to operators: Building mathematical competence on a foundation of everyday knowledge. In G. Leinhardt, R. T. Putnam, R. A. Hattrop, G. Leinhardt, R. T. Putnam & R. A. Hattrop (Hrsg.), *Analysis of arithmetic for mathematics teaching* (S. 373–429). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Reyna, V. F., Nelson, W. L., Han, P. K. & Dieckmann, N. F. (2009). How numeracy influences risk comprehension and medical decision making. *Psychological Bulletin*, 135(6), 943–973. doi:10.1037/a0017327
- Richlan, F., Kronbichler, M. & Wimmer, H. (2013). Structural abnormalities in the dyslexic brain: A meta-analysis of voxel-based morphometry studies. *Human brain mapping*, 34(11), 3055–3065.
- Ritchie, S. J. & Bates, T. C. (2013). Enduring links from childhood mathematics and reading achievement to adult socioeconomic status. *Psychological Science*, 24(7), 1301–1308. doi:10.1177/0956797612466268
- Rivera, S. M., Reiss, A. L., Eckert, M. A. & Menon, V. (2005). Developmental changes in mental arithmetic: Evidence for increased functional specialization in the left inferior parietal cortex. *Cerebral Cortex*, 15(11), 1779–1790. doi:10.1093/cercor/bhi055
- Roggeman, C., Santes, S., Fias, W. & Verguts, T. (2011). Stages of nonsymbolic number processing in occipitoparietal cortex disentangled by fMRI adaption. *Journal of Neuroscience*, 31(19), 7168–7173. doi:10.1523/JNEUROSCI.4503-10-2011
- Rosenberg-Lee, M., Ashkenazi, S., Chen, T., Young, C. B., Geary, D. C. & Menon, V. (2015). Brain hyper-connectivity and operation-specific deficits during arithmetic problem solving in children with developmental dyscalculia. *Developmental Science*, 18(3), 351–372. doi:10.1111/desc.12216

Rotzer, S., Kucian, K., Martin, E., von Aster, M., Klaver, P. & Loenneker, T. (2008).

Optimized voxel-based morphometry in children with developmental dyscalculia.

NeuroImage, 39(1), 417–422. doi:10.1016/j.neuroimage.2007.08.045

Rykhlevskaia, E., Uddin, L. Q., Kondos, L. & Menon, V. (2009). Neuroanatomical correlates of developmental dyscalculia: Combined evidence from morphometry and tractography. *Frontiers in Human Neuroscience*, 3, 51.

doi:10.3389/neuro.09.051.2009

Sandu, A. L., Staff, R. T., McNeil, C. J., Mustafa, N., Ahearn, T., Whalley, L. J. & Murray, A. D. (2014). Structural brain complexity and cognitive decline in late life—A longitudinal study in the Aberdeen 1936 Birth Cohort. *Neuroimage*, 100, 558–563.

Schipper, W. & Wartha, S. (2017). Diagnostik und Förderung von Kindern mit besonderen Schwierigkeiten beim Rechnenlernen. In A. Fritz, S. Schmidt & G. Ricken (Hrsg.), *Handbuch Rechenschwäche: Lernwege, Schwierigkeiten und Hilfen bei Dyskalkulie* (3. Aufl., S. 418–435). Weinheim: Beltz.

Schneider, M., Beeres, K., Coban, L., Merz, S., Schmidt, S. S., Stricker, J. & De Smedt, B. (2017). Associations of non-symbolic and symbolic numerical magnitude processing with mathematical competence: A meta-analysis. *Developmental Science*, 20(3), e12372. doi:10.1111/desc.12372

Schuchardt, K., Maehler, C., & Hasselhorn, M. (2008). Working memory deficits in children with specific learning disorders. *Journal of Learning Disabilities*, 41(6), 514–523. doi:10.1177/0022219408317856

Schulz, F., Wyschkon, A., Gallit, F. S., Poltz, N., Moraske, S., Kucian, K., ... Esser, G. (2018). Rechenprobleme von Grundschulkindern: Persistenz und Schulerfolg nach fünf Jahren. *Lernen und Lernstörungen*, 7(2), 67–80. doi:10.1024/2235-0977/a000206

- Seitz, R. (2011). Medialer Frontalkortex und subjektive Verhaltenskontrolle. *Neuroforum*, 17(4), 128–136. doi: 10.1515/nf-2011-0402
- Shalev, R. S., Manor, O., Auerbach, J. & Gross-Tsur, V. (1998). Persistence of developmental dyscalculia: What counts? Results from a 3-year prospective follow-up study. *The Journal of Pediatrics*, 133(3), 358–362. doi:10.1016/s0022-3476(98)70269-0
- Shalev, R. S., Manor, O. & Gross-Tsur, V. (2005). Developmental dyscalculia: A prospective six-year follow-up. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 47(2), 121–125. doi:10.1017/s0012162205000216
- Shalev, R. S., Manor, O., Kerem, B., Ayali, M., Badichi, N., Friedlander, Y. & Gross-Tsur, V. (2001). Developmental dyscalculia is a familial learning disability. *Journal of Learning Disabilities*, 34(1), 59–65. doi:10.1177/002221940103400105
- Shaywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Blachman, B. A., Pugh, K. R., Fulbright, R. K., Skudlarski, P., ... Marchione, K. E. (2004). Development of left occipitotemporal systems for skilled reading in children after a phonologically-based intervention. *Biological psychiatry*, 55(9), 926–933.
- Siegler, R. S. (1996). *Emerging minds: The process of change in children's thinking*. New York, NY: Oxford University Press.
- Siegler, R. S. & Jenkins, E. (1989). *How children discover new strategies*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Simms, V., Gilmore, C., Cragg, L., Clayton, S., Marlow, N. & Johnson, S. (2015). Nature and origins of mathematics difficulties in very preterm children: A different etiology than developmental dyscalculia. *Pediatric Research*, 77(2), 389–395. doi:10.1038/pr.2014.184

- Smith, C. N. & Squire, L. R. (2009). Medial temporal lobe activity during retrieval of semantic memory is related to the age of the memory. *Journal of Neuroscience*, 29(4), 930–938. doi:10.1523/JNEUROSCI.4545-08.2009
- Sokolowski, H. M., Fias, W., Bosah Ononye, C. & Ansari, D. (2017). Are numbers grounded in a general magnitude processing system? A functional neuroimaging meta-analysis. *Neuropsychologia*, 105, 50–69. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2017.01.019
- Spelke, E. S. & Kinzler, K. D. (2007). Core knowledge. *Developmental Science*, 10(1), 89–96. doi:10.1111/j.1467-7687.2007.00569.x
- Stern, E. (2008). Verpasste Chancen? Was wir aus der LOGIK-Studie über den Mathematikunterricht lernen können. In W. Schneider (Hrsg.), *Entwicklung von der Kindheit bis zum Erwachsenenalter. Befunde der Münchner Längsschnittstudie LOGIK* (S. 187–202). Weinheim: Beltz.
- Supekar, K., Swigart, A. G., Tenison, C., Jolles, D. D., Rosenberg-Lee, M., Fuchs, L. & Menon, V. (2013). Neural predictors of individual differences in response to math tutoring in primary-grade school children. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(20), 8230–8235. doi:10.1073/pnas.1222154110
- Szucs, D. & Goswami, U. (2007). Educational neuroscience: Defining a new discipline for the study of mental representations. *Mind, Brain, and Education*, 1(3), 114–127. doi:10.1111/j.1751-228X.2007.00012.x
- Talairach, J. & Tournoux, P. (1988). *Co-planar stereotaxic atlas of the human brain*. Stuttgart: Thieme

- Talati, A. & Hirsch, J. (2005). Functional Specialization within the Medial Frontal Gyrus for Perceptual Go/No-Go Decisions Based on “What,” “When,” and “Where” Related Information: An fMRI Study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(7), 981–993. doi: 10.1162/0898929054475226
- Toga A.W. & Thompson P. (1999). An introduction to brain warping. In A.W. Toga (Hrsg.), *Brain warping* (S. 1–26). San Diego, CA: Academic Press. doi:10.1016/B978-012692535-7/50077-X
- Tohka, J., Zijdenbos, A. & Evans, A. (2004). Fast and robust parameter estimation for statistical partial volume models in brain MRI. *NeuroImage*, 23(1), 84–97. doi:10.1016/j.neuroimage.2004.05.007
- Tosto, M. G., Momi, S. K., Asherson, P. & Malki, K. (2015). A systematic review of attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) and mathematical ability: Current findings and future implications. *BMC Medicine*, 13(1), 204. doi:10.1186/s12916-015-0414-4
- Tosto, M. G., Petrill, S. A., Halberda, J., Trzaskowski, M., Tikhomirova, T. N., Bogdanova, O. Y., ... Germine, L. (2014). Why do we differ in number sense? Evidence from a genetically sensitive investigation. *Intelligence*, 43, 35–46. doi:10.1016/j.intell.2013.12.007
- Uddin, L. Q. (2014). *Insula: Neuroanatomy, functions and clinical disorders*. Nova Science Publishers, Inc.
- Uddin, L. Q., Supekar, K., Amin, H., Rykhlevskaia, E., Nguyen, D. A., Greicius, M. D. & Menon, V. (2010). Dissociable connectivity within human angular gyrus and intraparietal sulcus: Evidence from functional and structural connectivity. *Cerebral Cortex*, 20(11), 2636–2646. doi:10.1093/cercor/bhq011

- Van Beek, L., Ghesquière, P., Lagae, L. & De Smedt, B. (2014). Left fronto-parietal white matter correlates with individual differences in children's ability to solve additions and multiplications: A tractography study. *NeuroImage*, 90, 117–127.
doi:10.1016/j.neuroimage.2013.12.030
- van der Sluis, S., de Jong, P. F. & van der Leij, A. (2004). Inhibition and shifting in children with learning deficits in arithmetic and reading. *Journal of Experimental Child Psychology*, 87(3), 239–266. doi:10.1016/j.jecp.2003.12.002
- van Eimeren, L., Niogi, S. N., McCandliss, B. D., Holloway, I. D. & Ansari, D. (2008). White matter microstructures underlying mathematical abilities in children. *NeuroReport*, 19(11), 1117–1121. doi:10.1097/WNR.0b013e328307f5c1
- Vogel, S. E., Remark, A. & Ansari, D. (2015). Differential processing of symbolic numerical magnitude and order in first-grade children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 129, 26–39. doi:10.1016/j.jecp.2014.07.010
- von Aster, M. (2000). Developmental cognitive neuropsychology of number processing and calculation: Varieties of developmental dyscalculia. *European Child & Adolescent Psychiatry*, 9(2), S41–S57. doi:10.1007/s007870070008
- von Aster, M. (2017). Dyskalkulie. Wenn Kinder nicht rechnen lernen. *Monatsschrift Kinderheilkunde*, 165(6), 482–489. doi:10.1007/s00112-017-0289-x
- von Aster, M., Kucian, K., Schweiter, M. & Martin, E. (2005). Rechenstörungen im Kindesalter. *Monatsschrift Kinderheilkunde*, 153(7), 614–622. doi:10.1007/s00112-005-1166-6
- von Aster, M., Schweiter, M. & Weinhold Zulauf, M. (2007). Rechenstörungen bei Kindern: Vorläufer, Prävalenz und psychische Symptome. *Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und Pädagogische Psychologie*, 39(2), 85–96.
doi:10.1026/0049-8637.39.2.85

von Aster, M. & Shalev, R. S. (2007). Number development and developmental dyscalculia.

Developmental Medicine & Child Neurology, 49(11), 868–873. doi:10.1111/j.1469-8749.2007.00868.x

von Aster, M., Weinhold Zulauf, M. & Horn, R. (2006). *ZAREKI-R: Neuropsychologische Testbatterie für Zahlenverarbeitung und Rechnen bei Kindern*. Frankfurt am Main: Harcourt Test Services.

Weiss, R. H. (2006). *CFT-20-R: Grundintelligenztest Skala 2* (revidierte Fassung).

Göttingen: Hogrefe.

Wilke, M., Holland, S. K., Altaye, M. & Gaser, C. (2008). Template-O-Matic: A toolbox for creating customized pediatric templates. *NeuroImage*, 41(3), 903–913.

doi:10.1016/j.neuroimage.2008.02.056

Wilson, A. J. & Dehaene, S. (2007). *Number sense and developmental dyscalculia*. In D.

Coch, G. Dawson & K. W Fischer (Hrsg.), *Human behavior, learning, and the developing brain: Atypical development* (S. 212–238). New York, NY: The Guilford Press.

Wyschkon, A., Kohn, J., Ballaschk, K. & Esser, G. (2009). Sind Rechenstörungen genau so häufig wie Lese-Rechtschreibstörungen? *Zeitschrift für Kinder- und*

Jugendpsychiatrie und Psychotherapie, 37(6), 499–512. doi:10.1024/1422-4917.37.6.499

Xenidou-Dervou, I., Molenaar, D., Ansari, D., van der Schoot, M. & van Lieshout, E. C.

(2017). Nonsymbolic and symbolic magnitude comparison skills as longitudinal predictors of mathematical achievement. *Learning and Instruction*, 50, 1–13.

doi:10.1016/j.learninstruc.2016.11.001

Xu, F. & Spelke, E. S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants.

Cognition, 74(1), B1–B11. doi:10.1016/S0010-0277(99)00066-9

Yang, J. J., Yoon, U., Yun, H. J., Im, K., Choi, Y. Y., Lee, K. H., ... Lee, J.-M. (2013).

Prediction for human intelligence using morphometric characteristics of cortical surface: Partial least square analysis. *Neuroscience*, 246, 351–361.

Yotter, R. A., Nenadic, I., Ziegler, G., Thompson, P. M. & Gaser, C. (2011). Local cortical surface complexity maps from spherical harmonic reconstructions. *NeuroImage*, 56(3), 961–973. doi:10.1016/j.neuroimage.2011.02.007

Zimmermann, P. & Fimm, B. (1993). *Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung (TAP)*.

Freiburg: Psytes

Anhang

Anhang A

Aufgaben BASIS-MATH 4-8 mit zugehörigen Einteilungen (Aufgabenart, Inhaltsbereich und Anforderungsniveau)

| Nr. | Aufgabe | Art | IB | AN | ZP |
|-----|---------------------------------------|-----------------------------|------|-----|------|
| 1a | 143 + 50 | Addition | 1 | I | ja |
| 1b | 57 + 6 | Addition | 1 | I | ja |
| 1c | 47 + 36 | Addition | 1 | I | ja |
| 1d | 199 + 198 | Addition | - | III | ja |
| 1e | 849 + 265 | Addition | 5 | III | ja |
| 2a | 690 - 50 | Subtraktion | 1 | I | ja |
| 2b | 53 - 7 | Subtraktion | 1 | I | ja |
| 2c | 430 - 70 | Subtraktion | 1 | I | ja |
| 2d | 701 - 698 | Subtraktion | 5 | III | ja |
| 2e | 475 - 176 | Subtraktion | - | III | ja |
| 3a | 73 + ... = 100 | Ergänzen | 1 | I | ja |
| 3b | 90 - ... = 83 | Ergänzen | 1, 3 | I | ja |
| 3c | 1596 + ... = 1600 | Ergänzen | 1, 3 | I | ja |
| 3d | 1000 - ... = 670 | Ergänzen | 1, 3 | I | ja |
| 3e | 3600 - ... = 3593 | Ergänzen | 1 | I | ja |
| 4a | 2 * 17 | Verdoppeln | 1 | I | ja |
| 4b | 2 * 107 | Verdoppeln | 1 | I | ja |
| 4c | 18 : 2 | Halbieren | - | I | ja |
| 4d | 180 : 2 | Halbieren | - | I | ja |
| 4e | 108 : 2 | Halbieren | 5 | II | ja |
| 5a | 7 * 6 | Multiplikation | 2 | I | ja |
| 5b | 8 * 9 | Multiplikation | 2 | I | ja |
| 5c | 30 * 40 | Multiplikation | 5 | II | ja |
| 5d | 10 * 256 | Multiplikation | 5 | I | ja |
| 5e | 150 * 20 | Multiplikation | 5 | II | ja |
| 5f | 3 * 5 = 15 | Multiplikation Geschichte | 6 | II | nein |
| 6a | 24 : 6 | Division | 2 | I | ja |
| 6b | 12 : 4 | Division | 2 | I | ja |
| 6c | 160 : 4 | Division | 2 | I | ja |
| 6d | 160 : 40 | Division | 2, 5 | I | ja |
| 6e | 1000 : 8 | Division | - | III | ja |
| 6f | 20 : 4 = 5 | Division Geschichte | 6 | II | nein |
| 7a | 2er Schritte vorwärts (185 - 209) | Zählen | 4 | II | nein |
| 7b | 10er Schritte rückwärts (137 bis 67) | Zählen | 4 | I | nein |
| 7c | 100er Schritte vorwärts (662 - 1462) | Zählen | 4 | I | nein |
| 8a | Zehnerbündel mit 57 schwarzen Punkten | Dezimalsystem Bündeln | 7 | I | nein |
| 8b | Zehnerbündel mit 124 Punkten | Dezimalsystem Bündeln | 7 | I | nein |
| 8c | 10 000 - 1 | Dezimalsystem grosse Zahlen | 7 | I | nein |

| Nr. | Aufgabe | Art | IB | AN | ZP |
|-----|---|--|------|-----|------|
| 8d | 10 000 - 10 | Dezimalsystem grosse Zahlen | 7 | I | nein |
| 8e | 100 000 - 100 | Dezimalsystem grosse Zahlen | 7 | III | nein |
| 8f | 100 000 - 1000 | Dezimalsystem grosse Zahlen | 7 | III | nein |
| 8g | Strich Zahl 86? | Dezimalsystem Zahlen einordnen (Zahlenstrahl) | - | II | nein |
| 8h | Strich Zahl 473? | Dezimalsystem Zahlen einordnen (Zahlenstrahl) | - | II | nein |
| 8i | Stellentafel: 7 T., 3 Z., 15 E. | Dezimalsystem Stellentafel | 7 | II | nein |
| 8j | Stellentafel: 2 T., 1 H., 35 Z., 4 E. | Dezimalsystem Stellentafel | 7 | III | nein |
| 9a | Peter hat 42 CDs. 15 gibt er Anne. Wie viele sind übrig? | Textaufgaben | 3, 6 | I | nein |
| 9b | Thomas gibt 6 CDs. 37 bleiben. Wie viele waren zu Beginn? | Textaufgaben | 6 | III | nein |
| 9c | Drei Käsekuchen kosten 7.20 Fr. Wie viel kostet ein Stück? | Textaufgaben | 6 | II | nein |

Anmerkungen. Nr. = Aufgabennummer; Art = Aufgabenart der entsprechenden Aufgabe;
IB = Inhaltsbereich (1 bis 7); AN = Anforderungsniveau (I, II oder III); ZP = Zusatzpunkt. ZP beschreibt,
ob bei der Aufgabe prinzipiell ein Zusatzpunkt erreicht werden kann.

IB 1 umfasst Addieren, Subtrahieren, Ergänzen, Verdoppeln mit einfachen Zahlen; IB 2 umfasst
Multiplizieren und Dividieren mit einfachen Zahlen; IB 3 umfasst Beziehung Teil-Ganzes; IB 4 umfasst
Zählen; IB 5 umfasst Grundoperationen mit grossen Zahlen und Übergängen; IB 6 umfasst
Mathematisieren und Textaufgaben; IB 7 umfasst Dezimalsystem.

Anhang B

Deskriptive Statistik der neuropsychologischen Tests

| | Gruppe | <i>n</i> | <i>M</i> | <i>SD</i> | Punkte | <i>P</i> | <i>r_{it}</i> |
|---------------------------------|--------|----------|----------|-----------|---------|----------|-----------------------|
| Gesamtpunktezahl | DD | 43 | 53.93 | 15.15 | 0 - 84 | - | - |
| | KG | 43 | 75.44 | 3.69 | | - | - |
| Zusatzpunkte gesamt | DD | 43 | 73.63 | 24.68 | 0 - 100 | - | - |
| | KG | 43 | 90.64 | 5.19 | | - | - |
| 1a Addition (143 + 50) | DD | 43 | 1.74 | 0.58 | 0 - 2 | 87.0 | .44 |
| | KG | 43 | 1.95 | 0.31 | | 97.5 | |
| 1b Addition (57 + 6) | DD | 43 | 1.51 | 0.77 | 0 - 2 | 75.5 | .62 |
| | KG | 43 | 1.95 | 0.31 | | 97.5 | |
| 1c Addition (47 + 36) | DD | 43 | 1.26 | 0.90 | 0 - 2 | 63.0 | .61 |
| | KG | 43 | 1.95 | 0.31 | | 97.5 | |
| 1d Addition (199 + 198) | DD | 43 | 0.79 | 0.74 | 0 - 2 | 39.5 | .42 |
| | KG | 43 | 1.26 | 0.54 | | 63.0 | |
| 1e Addition (849 + 265) | DD | 43 | 0.53 | 0.51 | 0 - 2 | 26.5 | .49 |
| | KG | 43 | 1.05 | 0.38 | | 52.5 | |
| 2a Subtraktion (690 - 50) | DD | 43 | 1.81 | 0.45 | 0 - 2 | 90.5 | .38 |
| | KG | 43 | 2.00 | 0.00 | | 100.0 | |
| 2b Subtraktion (53 - 7) | DD | 43 | 1.47 | 0.77 | 0 - 2 | 73.5 | .46 |
| | KG | 43 | 1.93 | 0.34 | | 96.5 | |
| 2c Subtraktion (430 - 70) | DD | 43 | 1.30 | 0.89 | 0 - 2 | 65.0 | .66 |
| | KG | 43 | 1.95 | 0.31 | | 97.5 | |
| 2d Subtraktion (701 - 698) | DD | 43 | 0.47 | 0.70 | 0 - 2 | 23.5 | .59 |
| | KG | 43 | 1.60 | 0.58 | | 80.0 | |
| 2e Subtraktion (475 - 176) | DD | 43 | 0.72 | 0.67 | 0 - 2 | 36.0 | .29 |
| | KG | 43 | 1.33 | 0.61 | | 66.5 | |
| 3a Ergänzen (73 + ... = 100) | DD | 43 | 1.35 | 0.87 | 0 - 2 | 67.5 | .58 |
| | KG | 43 | 1.95 | 0.31 | | 97.5 | |
| 3b Ergänzen (90 - ... = 83) | DD | 43 | 1.56 | 0.77 | 0 - 2 | 78.0 | .68 |
| | KG | 43 | 2.00 | 0.00 | | 100.0 | |
| 3c Ergänzen (1596 + ... = 1600) | DD | 43 | 1.35 | 0.87 | 0 - 2 | 67.5 | .55 |
| | KG | 43 | 1.95 | 0.31 | | 97.5 | |
| 3d Ergänzen (1000 - ... = 670) | DD | 43 | 1.30 | 0.89 | 0 - 2 | 65.0 | .71 |
| | KG | 43 | 1.95 | 0.31 | | 97.5 | |
| 3e Ergänzen (3600 - ... = 3593) | DD | 43 | 1.35 | 0.87 | 0 - 2 | 67.5 | .42 |
| | KG | 43 | 1.77 | 0.65 | | 88.5 | |
| 4a Verdoppeln (2 * 17) | DD | 43 | 1.53 | 0.70 | 0 - 2 | 76.5 | .47 |
| | KG | 43 | 1.98 | 0.15 | | 99.0 | |
| 4b Verdoppeln (2 * 107) | DD | 43 | 1.60 | 0.70 | 0 - 2 | 80.0 | .45 |
| | KG | 43 | 1.93 | 0.34 | | 96.5 | |
| 4c Halbieren (18 : 2) | DD | 43 | 1.49 | 0.83 | 0 - 2 | 74.5 | .58 |
| | KG | 43 | 1.95 | 0.31 | | 97.5 | |
| 4d Halbieren (180 : 2) | DD | 43 | 1.49 | 0.83 | 0 - 2 | 74.5 | .57 |
| | KG | 43 | 2.00 | 0.00 | | 100.0 | |
| 4e Halbieren (108 : 2) | DD | 43 | 1.42 | 0.85 | 0 - 2 | 71.0 | .66 |
| | KG | 43 | 1.95 | 0.31 | | 97.5 | |

| | Gruppe | <i>n</i> | <i>M</i> | <i>SD</i> | Punkte | <i>P</i> | <i>r_{it}</i> |
|--|--------|----------|----------|-----------|--------|----------|-----------------------|
| 5a Multiplikation (7 * 6) | DD | 43 | 1.47 | 0.80 | 0 - 2 | 73.5 | .53 |
| | KG | 43 | 1.86 | 0.47 | | 93.0 | |
| 5b Multiplikation (8 * 9) | DD | 43 | 1.47 | 0.83 | 0 - 2 | 73.5 | .54 |
| | KG | 43 | 1.95 | 0.31 | | 97.5 | |
| 5c Multiplikation (30 * 40) | DD | 43 | 0.70 | 0.94 | 0 - 2 | 35.0 | .55 |
| | KG | 43 | 1.63 | 0.79 | | 81.5 | |
| 5d Multiplikation (10 * 256) | DD | 43 | 1.70 | 0.67 | 0 - 2 | 85.0 | .61 |
| | KG | 43 | 2.00 | 0.00 | | 100.0 | |
| 5e Multiplikation (150 * 20) | DD | 43 | 1.12 | 0.98 | 0 - 2 | 56.0 | .58 |
| | KG | 43 | 1.86 | 0.52 | | 93.0 | |
| 5f Multiplikation Rechen- geschichte (3 * 5 = 15) | DD | 43 | 1.63 | 0.62 | 0 - 2 | 81.5 | .33 |
| | KG | 43 | 1.93 | 0.26 | | 96.5 | |
| 6a Division (24 : 6) | DD | 43 | 1.35 | 0.78 | 0 - 2 | 67.5 | .56 |
| | KG | 43 | 1.95 | 0.31 | | 97.5 | |
| 6b Division (12 : 4) | DD | 43 | 1.79 | 0.47 | 0 - 2 | 89.5 | .63 |
| | KG | 43 | 2.00 | 0.00 | | 100.0 | |
| 6c Division (160 : 4) | DD | 43 | 1.63 | 0.69 | 0 - 2 | 81.5 | .64 |
| | KG | 43 | 2.00 | 0.00 | | 100.0 | |
| 6d Division (160 : 40) | DD | 43 | 1.51 | 0.83 | 0 - 2 | 75.5 | .60 |
| | KG | 43 | 2.00 | 0.00 | | 100.0 | |
| 6e Division (1000 : 8) | DD | 43 | 0.49 | 0.74 | 0 - 2 | 24.5 | .61 |
| | KG | 43 | 1.53 | 0.70 | | 76.5 | |
| 6f Division Rechengeschichte (20 : 4 = 5) | DD | 43 | 1.19 | 0.73 | 0 - 2 | 59.5 | .39 |
| | KG | 43 | 1.79 | 0.47 | | 89.5 | |
| 7a Zählen (2er Schritte vorwärts, 185 bis 209) | DD | 43 | 0.58 | 0.50 | 0 - 1 | 58.0 | .40 |
| | KG | 43 | 0.91 | 0.29 | | 91.0 | |
| 7b Zählen (10er Schritte rückwärts, 137 bis 67) | DD | 43 | 0.53 | 0.51 | 0 - 1 | 53.0 | .47 |
| | KG | 43 | 0.88 | 0.32 | | 88.0 | |
| 7c Zählen (100er Schritte vorwärts, 662 bis 1462) | DD | 43 | 0.86 | 0.35 | 0 - 1 | 86.0 | .42 |
| | KG | 43 | 0.98 | 0.15 | | 98.0 | |
| 8a Dezimalsystem Bündeln (Zehnerbündel mit 57) | DD | 43 | 0.86 | 0.35 | 0 - 1 | 86.0 | .20 |
| | KG | 43 | 1.00 | 0.00 | | 100.0 | |
| 8b Dezimalsystem Bündeln (Zehnerbündel mit 124) | DD | 43 | 0.63 | 0.49 | 0 - 1 | 63.0 | .45 |
| | KG | 43 | 0.98 | 0.15 | | 98.0 | |
| 8c Dezimalsystem grosse Zahlen (10 000 - 1) | DD | 43 | 0.86 | 0.35 | 0 - 1 | 86.0 | 0.47 |
| | KG | 43 | 1.00 | 0.00 | | 100.0 | |
| 8d Dezimalsystem grosse Zahlen (10 000 - 10) | DD | 43 | 0.51 | 0.51 | 0 - 1 | 51.0 | .61 |
| | KG | 43 | 0.91 | 0.29 | | 91.0 | |

| | Gruppe | <i>n</i> | <i>M</i> | <i>SD</i> | Punkte | <i>P</i> | <i>r_{it}</i> |
|--|--------|----------|----------|-----------|--------|----------|-----------------------|
| 8e Dezimalsystem grosse Zahlen (100 000 - 100) | DD | 43 | 0.30 | 0.47 | 0 - 1 | 30.0 | .53 |
| | KG | 43 | 0.77 | 0.43 | | 77.0 | |
| 8f Dezimalsystem grosse Zahlen (100 000 - 1000) | DD | 43 | 0.28 | 0.45 | 0 - 1 | 28.0 | .48 |
| | KG | 43 | 0.63 | 0.49 | | 63.0 | |
| 8g Dezimalsystem (Zahlenstrahl 86) | DD | 43 | 0.79 | 0.41 | 0 - 1 | 79.0 | .31 |
| | KG | 43 | 0.91 | 0.29 | | 91.0 | |
| 8h Dezimalsystem (Zahlenstrahl 473) | DD | 43 | 0.49 | 0.51 | 0 - 1 | 49.0 | .30 |
| | KG | 43 | 0.67 | 0.47 | | 67.0 | |
| 8i Dezimalsystem Stellentafel (7 T., 3 Z., 15 E.) | DD | 43 | 0.53 | 0.51 | 0 - 1 | 53.0 | .40 |
| | KG | 43 | 0.86 | 0.35 | | 86.0 | |
| 8j Dezimalsystem Stellentafel (2 T., 1 H., 35 Z., 4 E.) | DD | 43 | 0.44 | 0.50 | 0 - 1 | 44.0 | .44 |
| | KG | 43 | 0.67 | 0.47 | | 67.0 | |
| 9a Textaufgaben (Peter hat 42 CDs, 15 CDs gibt er Anne) | DD | 43 | 1.77 | 0.53 | 0 - 2 | 88.5 | .47 |
| | KG | 43 | 2.00 | 0.00 | | 100.0 | |
| 9b Textaufgaben (Thomas gibt Laura 6 CDs, 37 bleiben. Wieviele anfangs?) | DD | 43 | 1.21 | 0.94 | 0 - 2 | 60.5 | .37 |
| | KG | 43 | 1.60 | 0.79 | | 80.0 | |
| 9c Textaufgaben (Drei Käsekuchen kosten 7.20 Fr. Ein Stück = ?) | DD | 43 | 1.21 | 0.80 | 0 - 2 | 60.5 | .63 |
| | KG | 43 | 1.77 | 0.43 | | 88.5 | |
| Aufgabenart: Addition | DD | 43 | 1.17 | 0.44 | 0 - 2 | - | - |
| | KG | 43 | 1.63 | 0.17 | | - | - |
| Aufgabenart: Subtraktion | DD | 43 | 1.15 | 0.38 | 0 - 2 | - | - |
| | KG | 43 | 1.76 | 0.21 | | - | - |
| Aufgabenart: Ergänzen | DD | 43 | 1.38 | 0.61 | 0 - 2 | - | - |
| | KG | 43 | 1.93 | 0.18 | | - | - |
| Aufgabenart: Verdoppeln | DD | 43 | 1.57 | 0.59 | 0 - 2 | - | - |
| | KG | 43 | 1.95 | 0.21 | | - | - |
| Aufgabenart: Halbieren | DD | 43 | 1.47 | 0.73 | 0 - 2 | - | - |
| | KG | 43 | 1.97 | 0.14 | | - | - |
| Aufgabenart: Multiplikation | DD | 43 | 1.29 | 0.55 | 0 - 2 | - | - |
| | KG | 43 | 1.86 | 0.25 | | - | - |
| Aufgabenart: Division | DD | 43 | 1.35 | 0.49 | 0 - 2 | - | - |
| | KG | 43 | 1.90 | 0.15 | | - | - |
| Aufgabenart: Zählen | DD | 43 | 0.66 | 3.45 | 0 - 1 | - | - |
| | KG | 43 | 0.92 | 0.19 | | - | - |
| Aufgabenart: Dezimalsystem | DD | 43 | 0.57 | 0.25 | 0 - 1 | - | - |
| | KG | 43 | 0.84 | 0.14 | | - | - |
| Aufgabenart: Textaufgaben | DD | 43 | 1.40 | 0.56 | 0 - 2 | - | - |
| | KG | 43 | 1.79 | 0.26 | | - | - |
| Aufgabenart: Rechengeschichten | DD | 43 | 1.41 | 0.56 | 0 - 2 | - | - |
| | KG | 43 | 1.86 | 0.27 | | - | - |

| | Gruppe | <i>n</i> | <i>M</i> | <i>SD</i> | Punkte | <i>P</i> | <i>r_{it}</i> |
|--|--------|----------|----------|-----------|---------|----------|-----------------------|
| IB 1: Addieren, Subtrahieren, Ergänzen, Verdoppeln einfache Zahlen | DD | 43 | 1.47 | 0.45 | 0 - 2 | - | - |
| | KG | 43 | 1.94 | 0.10 | | - | - |
| IB 2: Multiplizieren und Dividieren einfachen Zahlen | DD | 43 | 1.54 | 0.52 | 0 - 2 | - | - |
| | KG | 43 | 1.96 | 0.13 | | - | - |
| IB 3: Beziehung Teil-Ganzes | DD | 43 | 1.49 | 0.55 | 0 - 2 | - | - |
| | KG | 43 | 1.98 | 0.11 | | - | - |
| IB 4: Zählen | DD | 43 | 0.66 | 0.35 | 0 - 1 | - | - |
| | KG | 43 | 0.92 | 0.19 | | - | - |
| IB 5: Grundoperationen grosse Zahlen und Übergänge | DD | 43 | 1.06 | 0.49 | 0 - 2 | - | - |
| | KG | 43 | 1.73 | 0.20 | | - | - |
| IB 6: Mathematisieren / Textaufgaben | DD | 43 | 1.40 | 0.43 | 0 - 2 | - | - |
| | KG | 43 | 1.82 | 0.18 | | - | - |
| IB 7: Dezimalsystem | DD | 43 | 0.55 | 0.27 | 0 - 1 | - | - |
| | KG | 43 | 0.85 | 0.14 | | - | - |
| Anforderungsniveau I | DD | 43 | 1.35 | 0.36 | 0 - 2 | - | - |
| | KG | 43 | 1.75 | 0.05 | | - | - |
| Anforderungsniveau II | DD | 43 | 0.97 | 0.37 | 0 - 2 | - | - |
| | KG | 43 | 1.43 | 0.16 | | - | - |
| Anforderungsniveau III | DD | 43 | 0.58 | 0.31 | 0 - 2 | - | - |
| | KG | 43 | 1.16 | 0.27 | | - | - |
| IQ | DD | 41 | 48.62 | 20.97 | 0 - 100 | - | - |
| | KG | 40 | 69.81 | 19.77 | | - | - |
| Alertness | DD | 41 | 45.74 | 12.68 | 0 - 100 | - | - |
| | KG | 23 | 47.37 | 9.50 | | - | - |
| Go/Nogo | DD | 41 | 60.73 | 30.47 | 0 - 100 | - | - |
| | KG | 24 | 62.67 | 28.05 | | - | - |
| Go/Nogo Fehler | DD | 41 | 4.59 | 3.15 | 0 - ∞ | - | - |
| | KG | 24 | 4.54 | 2.59 | | - | - |
| Arbeitsgedächtnis | DD | 22 | 5.48 | 0.66 | 0 - 9 | - | - |
| | KG | 7 | 6.21 | 1.25 | | - | - |
| Mathematikangst | DD | 28 | 34.18 | 16.57 | 0 - 60 | - | - |
| | KG | 12 | 14.08 | 12.46 | | - | - |

Anmerkungen. Für die einzelnen Aufgaben gilt der mittlere Punktwert und für die Gesamtpunktezah die mittlere Summe der Punktwerte der Gruppen. Die Zusatzpunktezah gesamt entspricht dem prozentualen Anteil, der durch die Anwendung von Strategien zur Lösung der Aufgaben beigetragen hat. Zur Bestimmung der Werte der Aufgabenart, Inhaltsbereiche und Anforderungsniveaus wurde der mittlere Wert gewählt. Der Wert des IQ, der Alertness sowie des Go/Nogo-Tests sind in Prozenträngen angegeben. Go/Nogo Fehler entspricht der Anzahl resultierter Fehler im Go/Nogo-Test. Das Arbeitsgedächtnis entspricht der Länge der Sequenz der Blöcke im Corsi-Block-Tapping. Die Mathematikangst entspricht dem summierten Wert im MAI. DD = Dyskalkuliker; KG = Kontrollgruppe; *n* = Anzahl Versuchspersonen; *M* = Mittelwert; *SD* = Standardabweichung; Punkte = mögliche zu erreichende Punktezah; *P* = Schwierigkeitsindex; *r_{it}* = Trennschärfen; IB = Inhaltsbereich; IQ = Intelligenzquotient.

Anhang C

Rotierte Komponentenmatrix der explorativen Faktorenanalyse mit Oblimin-Rotation

| Aufgabe | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 9b | ,755 | -,034 | ,026 | ,006 | -,063 | ,126 | ,078 | -,015 | ,128 | ,183 | -,025 | -,368 | -,125 | -,148 | -,146 | -,133 |
| 5c | ,687 | ,031 | ,034 | -,003 | -,038 | -,216 | -,156 | ,272 | ,052 | -,272 | -,155 | -,137 | ,179 | ,257 | -,024 | -,129 |
| 9c | ,597 | -,160 | -,182 | ,157 | ,145 | ,074 | -,030 | -,286 | -,171 | -,152 | ,053 | ,053 | ,070 | ,011 | -,063 | ,233 |
| 2e | ,034 | -,853 | -,027 | -,091 | ,010 | ,062 | ,037 | -,042 | -,117 | ,071 | ,317 | ,109 | -,075 | ,021 | ,088 | -,063 |
| 5f | ,128 | ,418 | ,009 | -,108 | ,249 | ,259 | ,011 | ,040 | -,238 | ,349 | ,063 | ,063 | ,022 | -,019 | -,200 | ,295 |
| 5a | ,144 | -,319 | -,188 | -,132 | -,124 | ,028 | ,269 | -,147 | -,033 | ,000 | ,086 | ,173 | ,178 | ,100 | -,309 | ,081 |
| 8e | -,012 | -,059 | -,897 | ,027 | -,023 | -,151 | ,079 | ,024 | -,018 | -,034 | ,014 | -,028 | ,035 | -,062 | -,131 | ,028 |
| 8f | ,053 | ,002 | -,871 | ,042 | -,046 | -,072 | -,024 | ,094 | ,102 | -,024 | -,022 | -,108 | ,044 | -,051 | -,009 | ,143 |
| 8d | -,060 | ,032 | -,658 | -,018 | -,041 | ,297 | ,100 | ,012 | -,123 | -,106 | ,204 | -,003 | ,191 | ,048 | -,061 | -,124 |
| 8a | -,012 | ,124 | -,096 | ,905 | -,095 | -,076 | -,147 | -,072 | ,031 | -,116 | -,004 | ,059 | ,077 | -,005 | ,000 | -,044 |
| 8g | ,214 | -,026 | ,204 | ,537 | ,041 | ,089 | ,353 | ,040 | -,191 | -,102 | ,131 | -,069 | ,061 | ,075 | ,130 | ,217 |
| 8b | -,026 | ,053 | -,162 | ,254 | -,786 | ,038 | -,018 | -,068 | ,182 | ,254 | -,081 | ,100 | -,035 | ,061 | -,118 | ,136 |
| 4a | ,008 | -,174 | ,333 | -,279 | -,515 | -,072 | -,047 | ,053 | -,124 | -,223 | ,243 | -,081 | ,220 | ,053 | -,060 | -,080 |
| 7a | -,094 | ,067 | ,007 | -,077 | -,009 | ,866 | ,016 | ,053 | ,148 | ,093 | -,085 | -,090 | ,016 | ,191 | -,039 | ,050 |
| 7c | ,203 | -,349 | ,121 | ,042 | -,040 | ,608 | -,132 | -,112 | -,178 | -,321 | -,056 | -,096 | -,157 | ,000 | -,004 | ,274 |
| 7b | ,053 | -,239 | ,071 | ,190 | ,025 | ,476 | ,131 | -,040 | ,103 | -,088 | ,173 | ,093 | ,380 | -,152 | -,236 | -,262 |
| 9a | -,007 | ,071 | -,131 | -,061 | -,037 | ,036 | ,797 | ,099 | -,069 | -,092 | ,092 | -,132 | -,015 | ,050 | -,019 | ,039 |
| 6f | ,135 | ,234 | -,034 | ,068 | -,142 | ,376 | -,571 | ,127 | -,103 | ,012 | ,434 | -,029 | -,097 | -,047 | ,008 | -,010 |
| 1e | -,022 | ,075 | -,041 | ,027 | -,063 | ,051 | ,220 | ,765 | -,027 | -,226 | ,225 | -,056 | -,106 | ,139 | -,092 | ,139 |
| 3e | -,105 | -,032 | ,151 | ,182 | -,142 | ,039 | ,120 | -,734 | ,038 | -,131 | ,145 | -,115 | -,060 | ,152 | -,248 | -,030 |
| 3b | ,268 | ,001 | -,157 | -,104 | -,357 | -,111 | ,117 | -,489 | -,065 | -,157 | ,031 | -,029 | ,049 | -,073 | -,109 | ,302 |
| 3c | ,104 | ,098 | ,217 | -,171 | ,181 | ,215 | ,189 | -,405 | ,385 | -,044 | ,019 | -,070 | ,178 | ,303 | ,124 | ,302 |
| 8i | ,155 | ,171 | -,192 | ,047 | -,149 | ,126 | -,071 | -,125 | ,648 | -,088 | ,076 | ,021 | -,181 | ,096 | -,157 | -,123 |
| 1c | ,210 | -,047 | -,368 | -,036 | -,010 | ,012 | ,098 | -,095 | -,562 | ,020 | -,071 | -,196 | ,088 | ,410 | ,010 | -,122 |
| 2a | -,009 | ,065 | -,066 | ,116 | ,115 | ,025 | ,139 | ,053 | ,045 | -,882 | -,075 | ,031 | -,020 | -,083 | -,089 | ,020 |
| 3d | ,237 | ,053 | -,087 | ,136 | ,044 | -,005 | -,049 | -,179 | ,009 | -,479 | ,332 | ,166 | ,198 | ,160 | -,033 | ,101 |
| 6b | ,039 | -,103 | ,072 | -,283 | -,313 | ,105 | -,103 | ,028 | ,046 | -,442 | ,267 | -,069 | ,213 | ,027 | -,258 | -,027 |
| 8c | -,030 | -,009 | -,231 | -,345 | ,082 | -,068 | -,097 | -,376 | ,200 | -,392 | ,162 | -,124 | ,177 | ,127 | ,276 | ,147 |
| 1a | -,105 | -,054 | -,077 | ,011 | ,020 | -,040 | ,054 | ,050 | ,087 | -,004 | ,856 | -,192 | -,036 | -,001 | ,027 | ,090 |
| 6d | ,326 | -,404 | -,181 | -,137 | ,030 | -,318 | ,049 | -,008 | ,189 | ,048 | ,431 | ,085 | ,020 | ,218 | -,163 | ,016 |
| 4b | -,134 | -,256 | ,153 | ,135 | -,080 | -,321 | -,221 | -,139 | -,192 | -,022 | ,406 | -,355 | ,114 | -,010 | -,203 | ,238 |
| 4c | ,036 | ,100 | -,127 | -,114 | ,077 | ,009 | ,160 | ,020 | -,061 | -,074 | ,147 | -,741 | -,033 | -,006 | -,050 | ,033 |
| 4e | ,253 | -,018 | ,105 | ,148 | ,042 | -,001 | ,134 | -,003 | ,144 | ,014 | ,109 | -,716 | ,097 | ,093 | ,079 | ,119 |
| 4d | ,099 | ,232 | -,197 | -,097 | -,027 | ,115 | -,061 | -,175 | -,215 | ,045 | ,066 | -,707 | ,012 | ,037 | ,094 | -,033 |
| 5e | ,004 | -,303 | -,167 | ,441 | ,019 | ,016 | -,016 | ,125 | ,261 | ,227 | -,032 | -,488 | ,130 | ,108 | -,115 | ,095 |
| 5d | ,018 | -,060 | -,002 | -,078 | -,317 | ,222 | ,250 | ,086 | ,393 | -,164 | ,024 | -,427 | ,100 | -,010 | ,041 | ,184 |
| 2b | -,072 | ,022 | -,061 | ,079 | ,017 | -,056 | ,003 | -,017 | -,048 | -,043 | -,214 | -,021 | ,891 | ,011 | -,040 | ,076 |
| 2c | ,076 | ,142 | -,026 | ,075 | -,111 | ,029 | ,086 | -,066 | -,033 | ,049 | ,446 | ,006 | ,700 | -,040 | ,007 | -,025 |
| 1b | ,099 | ,196 | -,205 | -,174 | ,005 | ,080 | -,088 | -,098 | -,287 | ,086 | -,027 | -,211 | ,442 | ,284 | -,173 | ,007 |
| 1d | -,250 | -,186 | ,179 | -,024 | ,110 | ,059 | ,031 | -,014 | ,016 | -,055 | -,203 | -,132 | ,168 | ,800 | -,118 | ,058 |
| 2d | ,212 | ,112 | ,082 | ,039 | -,263 | ,041 | ,162 | ,081 | -,031 | ,190 | ,202 | ,228 | -,079 | ,791 | ,174 | ,025 |
| 8j | -,041 | -,020 | -,441 | ,059 | ,099 | ,128 | -,060 | -,089 | ,069 | -,095 | ,032 | -,173 | -,126 | ,586 | -,008 | ,006 |
| 6a | -,045 | ,100 | -,101 | -,003 | -,086 | ,069 | ,062 | -,085 | ,059 | ,017 | -,055 | ,057 | ,077 | -,114 | -,837 | ,030 |
| 6c | ,070 | -,123 | -,116 | -,125 | -,135 | ,053 | -,062 | ,060 | -,099 | -,212 | -,033 | ,050 | ,121 | ,049 | -,599 | ,196 |
| 8h | ,219 | ,182 | ,015 | ,209 | ,384 | -,115 | -,115 | ,030 | ,266 | -,078 | ,160 | -,075 | -,174 | ,198 | -,561 | -,043 |
| 5b | ,289 | ,217 | ,139 | -,273 | -,328 | -,185 | ,089 | ,019 | -,151 | -,018 | -,109 | -,358 | -,025 | ,061 | -,370 | ,138 |
| 3a | -,205 | ,127 | -,035 | ,073 | -,134 | ,026 | ,143 | ,039 | -,034 | -,068 | ,062 | -,070 | ,011 | -,016 | -,136 | ,801 |
| 6e | ,221 | -,104 | -,319 | -,121 | ,000 | ,102 | -,134 | ,335 | ,215 | ,197 | ,017 | ,122 | ,323 | ,014 | ,030 | ,491 |

Anmerkungen. Ersichtlich ist die Zuordnung der einzelnen Aufgaben zu den 16 Faktoren abhängig vom Lösungsverhalten der Dyskalkulier. Der graue Hintergrund deutet die Aufgabenblöcke der gebildeten Faktoren an. Der gelbe Hintergrund verweist auf Querladungen.



**Universität
Zürich** ^{UZH}

Psychologisches Institut

Bachelor- und Masterstudiengang

Universität Zürich
Psychologisches Institut
Bachelor- und Masterstudiengang
Binzmühlestrasse 14,
Box 1 CH-8050 Zürich
www.psychologie.uzh.ch

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass die Masterarbeit von mir selbst ohne unerlaubte Beihilfe verfasst worden ist und ich die Grundsätze wissenschaftlicher Redlichkeit einhalte (vgl. dazu: <http://www.uzh.ch/de/studies/teaching/plagiate.html>).

Name: Meier
Vorname Patricia
Matrikelnummer 14-657-415

Dübendorf, 30.11.2020

Ort und Datum

Unterschrift